CIEN AÑOS DE MISTERIOS CUANTICOS

INVESTIGACION y CIENCIA

ABRIL 2001
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

APROVECHAMIENTO RACIONAL DEL AGUA

- Uniones túnel magnéticas
- Evolución de los cromosomas sexuales
- Ciencia de la persuasión





Abril de 2001 Número 295

SECCIONES

SECCIONES



Portada: Slim Films

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Biophoto Associates
6-7	Hesed Padilla-Nash (*micrografía*); Alfred T. Kamajian y Heidi Noland (*izquierda* y *arriba*)
8	Razi Searles (*gato*); Alfred T. Kamajian
9	Mark Harmel *Stone*
12	Peter Murphy
14	Jared Schneidman Design (*ilustraciones*); Lumileds Lighting (*fotografía*)
15	Lumileds Lighting (*arriba*); Phil Degginger *Stone* (*abajo*)
16	Greg Marshall
17	Color Kinetics (arriba, izquierda); Lumileds Lighting
20-21	Paul Edmondson *Stone*
22	Richard Hamilton Smith *Corbis*
24-25	Johnny Johnson; fuente: Peter H. Gleick
26	AP PHOTO
29	David Barnes *Stone*
30	Johnny Johnson
31	Cortesía de International Development Enterprises
32	John K. Humble *Stone*
33	AP PHOTO
34	Tom Schierlitz *Stone*
35	Peter Johnson *Corbis*
48-49	Wiley-VCH Verlag Berlin GMBH; Bettmann/Corbis; Roger Ressmeyer *Corbis*; CERN; Texas Center for Superconductivity, Univ. de Houston; AT&T Archives; Bettmann/Corbis; Jila Bec Group; Bettmann/Corbis; The Albert Einstein Archives, Hebrev University of Jerusalem; AP Emilio Segrè Visual Archives; AIP Meggers Gallery of Nobel Laureates; Bettmann/Corbis; AP Emilio Segrè Visual Archives (Gift of Josh Lemmerich)
50-54	Laurie Grace
58-59	© Gert Lange
60	Thomas Braun/SDW/Alfred-Wegener-Institut
61	© Gert Lange (*arriba*); Alfred-Wegener-Institut/Heinrich Miller (*abajo*)
62-63	© Gert Lange
64	Alfred-Wegener-Institut
65	© Gert Lange
67	Steven Adams *AP Photo*
68	Luis M. Alvarez *AP Photo* (*abajo*)
69	Tupperware (1958) (*arriba*); Ric Field (*abajo*)
70	Peter Barreras
71	Dusan Petricic
72-76	José M.ª De Teresa Nogueras
77	R. Lyonnet y J. L. Maurice
78-80	José M.ª De Teresa Nogueras

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Esteban Santiago: *El cromosoma de la masculinidad*; Francisco Gracia García-Miguel: *Diodos emisores de luz*; Juan Pedro Campos: *La protección del agua*, *La importancia de cada molécula* y *Aprovechamiento agrícola del agua*; Angel Garcimartín: *Asegurar el suministro de agua* y *Perfiles*; Xavier Roqué: *Cien años de misterios cuánticos*; Francesc Asensi: *La cordillera Alfa*; José M.ª Valderas Martínez: *Psicología de la persuasión* y *Nexos*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky, George Musser y Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

CENSO DE 1950. «Entre 1940 y 1950 los EE.UU. experimentaron el mayor aumento demográfico de su historia. Según los primeros avances del censo oficial de 1950, la población creció en más de 19 millones durante el decenio. No se esperaba semejante aumento: el total de 150.697.361 de 1950 rebasó en unos siete millones la mayor de las previsiones hechas por los expertos en demografía diez años atrás. La prosperidad de los años de guerra elevó la natalidad y produjo la mayor cosecha de bebés hasta la fecha. Concurrentemente la mortalidad ha caído a un nuevo mínimo. La inmigración, pese a ser un factor más o menos despreciable, añadió en torno a un millón, incluyendo refugiados y desplazados.»

ESCASEZ DE DDT. «La Organización Mundial de la Salud informó el mes pasado de una creciente escasez de DDT, tan grave que amenaza con hacer fracasar la campaña contra las enfermedades propagadas por insectos, campaña que desde el final de la guerra había acabado con el paludismo en muchos lugares del mundo. La carestía se debe al uso creciente del insecticida por los agricultores y por las fuerzas armadas para el programa de defensa y a la escasez de ingredientes. Roberto Cáceres Bustamante, Ministro de Sanidad de El Salvador, declara que 'para nosotros el DDT es una cuestión de vida o muerte. En una población de 2.500.000 hay más de 200.000 casos de paludismo'. El insecticida ha reducido en un 40 por ciento la incidencia del paludismo en El Salvador.»

...cien años

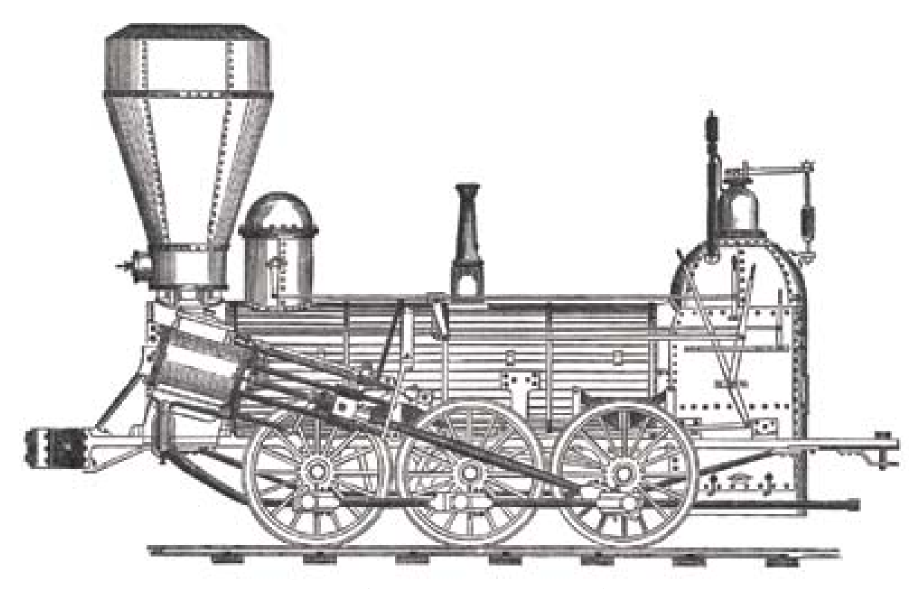
NEGACIÓN RABIOSA. «En su informe ante la Asociación Americana de Sanidad Pública, la comisión delegada afirma que en EE.UU. la rabia se está extendiendo y opina que no se sabe de un solo caso de sanación. Por letal que para el hombre sea la enfermedad, la comisión encuentra la mayor causa de alarma no en la naturaleza de por sí fatal de la enfermedad, ni siquiera en las dificultades de las autoridades sanitarias para controlarla, sino en la existencia en el país de numerosas sociedades con gran cantidad de miembros que deliberada y activamente ponen en circulación documentos ideados para engañar a la gente respecto a la existencia de la enfermedad y que obstaculizan los esfuerzos de los sanitarios para erradicarla. A menudo se ha sostenido que no ha habido ni un solo caso bien comprobado de rabia ni de hidrofobia en la ciudad de Nueva York durante los últimos treinta años, y sin embargo los registros del Colegio de Veterinarios Americanos muestran una media de siete casos anuales durante veinticinco años.»

RAYOS X. «Cinco años han pasado desde que el profesor Röntgen asombrara al mundo con el descubrimiento de los rayos que llevan su nombre. Debemos admitir que acerca de la naturaleza de esos rayos hoy no se sabe más que lo expuesto en el documento original de Röntgen. No se comportan como ninguna otra radiación conocida; pero los científicos suelen ubicarla en la región ultravioleta del espectro, poseyendo quizá la longitud de onda más corta de todas las radiaciones conocidas; tan corta que es imposible desviarlos de su trayectoria mediante ninguna especie de sustancia reflectora o refractora.»

...ciento cincuenta años

HUEVOS FÓSILES. «Recién llegados a Francia desde la isla de Madagascar, son tres los enormes huevos fósiles, con huesos de un ave gigante, que sin duda los empolló. Monsieur Isidor Geoffroy St. Hilaire declara que tales restos extraordinarios pertenecen a un ave que él ha bautizado como *Epiornis*. Esta se clasifica entre las gigantescas aves fósiles de Nueva Zelanda, que eran corredoras. El descubrimiento se debió a un accidente curioso. El capitán de un barco mercante que comerciaba con Madagascar había observado que cierto nativo usaba un huevo de vasija; le contó el malgache que procedía del interior de la isla, donde se hallaron muchos otros iguales.»

LA MÁQUINA DE TREN. «La locomotora es la más perfecta de las máquinas. Se acerca a la combinación espiritual y física de la máquina humana mucho más que cualquier otra. En ella contemplamos lo que es el motor de vapor 'libre de cadenas que lo aten a las piedras o al suelo'. El grabado nos muestra la vista lateral de una locomotora norteamericana quemadora de madera, con las palancas representadas por el grabador a la izquierda. La máquina tiene una potencia de 162 caballos y es capaz de arrastrar 225 toneladas a una velocidad de casi cincuenta kilómetros por hora.»

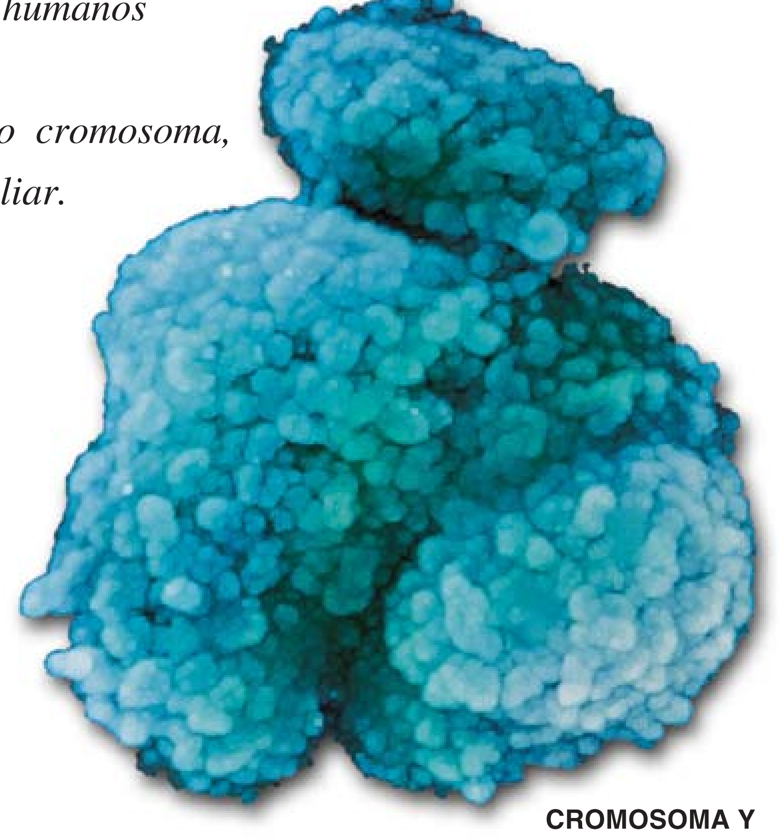


Locomotora, "la máquina más perfecta", 1851

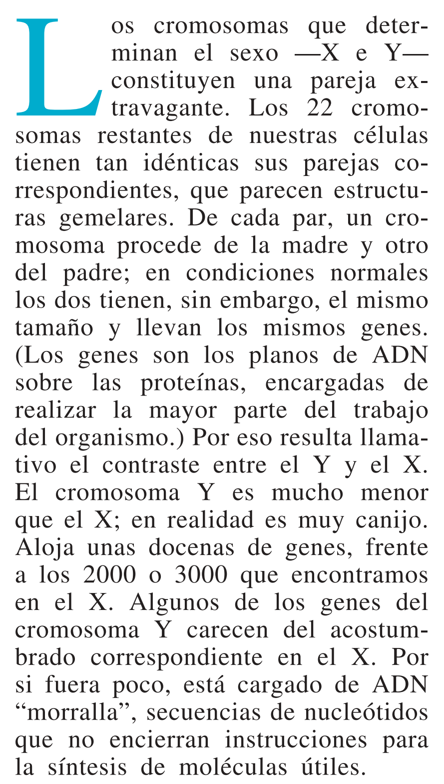
El cromosoma de

Los cromosomas X e Y de los humanos forman una extraña pareja. El X se parece a cualquier otro cromosoma, pero el Y resulta bastante peculiar. ¿Qué evolución han seguido?

Karin Jegalian y Bruce T. Lahn



CROMOSOMA Y



Los cromosomas que determinan el sexo —X e Y— constituyen una pareja extravagante. Los 22 cromosomas restantes de nuestras células tienen tan idénticas sus parejas correspondientes, que parecen estructuras gemelares. De cada par, un cromosoma procede de la madre y otro del padre; en condiciones normales los dos tienen, sin embargo, el mismo tamaño y llevan los mismos genes. (Los genes son los planos de ADN sobre las proteínas, encargadas de realizar la mayor parte del trabajo del organismo.) Por eso resulta llamativo el contraste entre el Y y el X. El cromosoma Y es mucho menor que el X; en realidad es muy canijo. Aloja unas docenas de genes, frente a los 2000 o 3000 que encontramos en el X. Algunos de los genes del cromosoma Y carecen del acostumbrado correspondiente en el X. Por si fuera poco, está cargado de ADN "morralla", secuencias de nucleótidos que no encierran instrucciones para la síntesis de moléculas útiles.

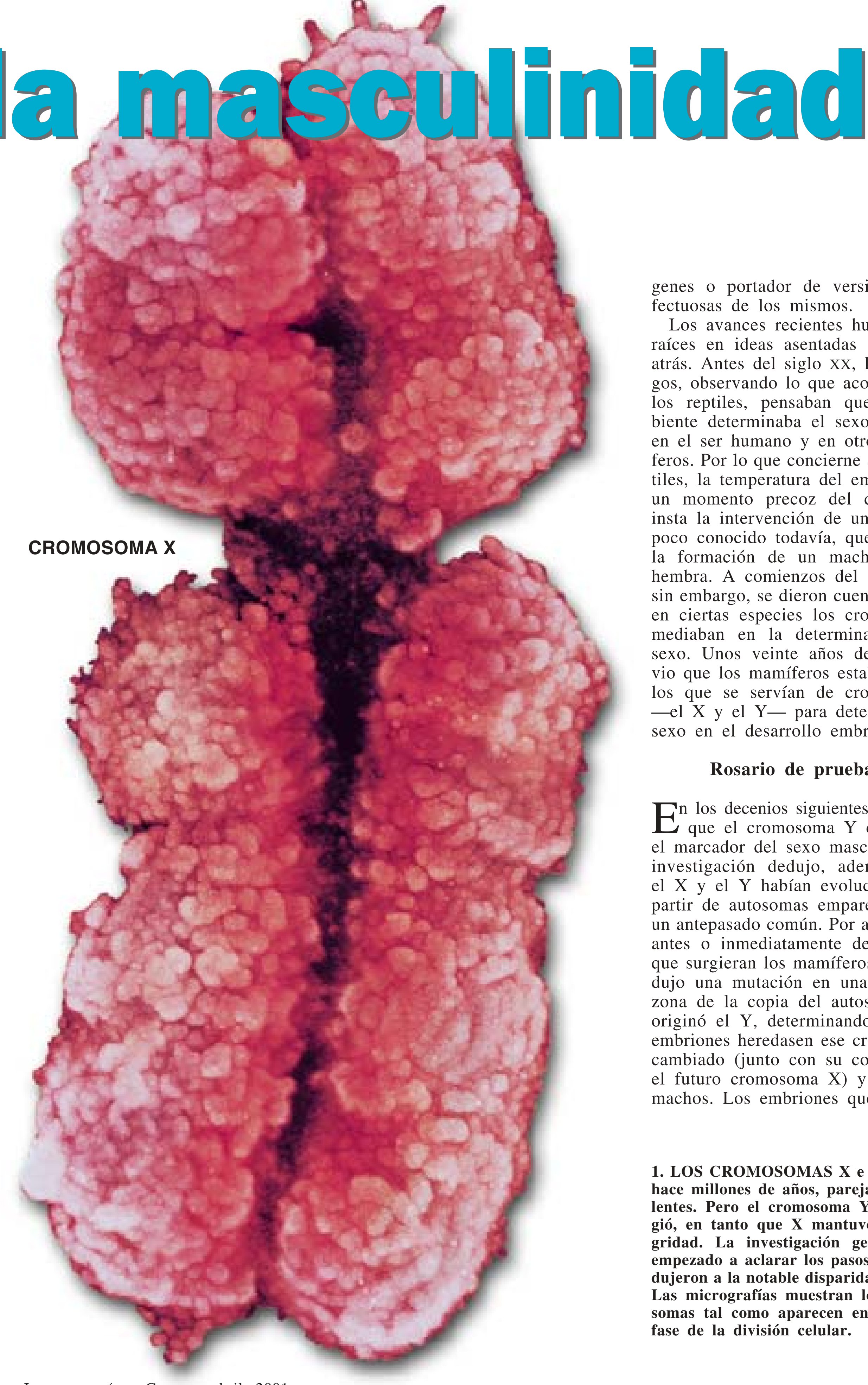
Hasta hace poco, los biólogos se veían incapaces de explicar los mecanismos que le habían conducido a semejante estado de penuria. Algunas teorías había, pero no sabían cómo someterlas a contrastación. La situación ha dado un giro copernicano, gracias en buena medida al Proyecto Genoma Humano y otros esfuerzos parecidos encaminados a descifrar la secuencia completa de los nucleótidos de ADN en los 24 cromosomas del ser humano: X, Y y los 22 autosomas (los cromosomas no involucrados en la determinación del sexo). A la manera en que los paleontólogos trazan la evolución seguida por una especie apoyados en el estudio de los esqueletos de los animales actuales y de los fósiles, los biólogos moleculares recorren la evolución de cromosomas y genes mediante las huellas dejadas en las secuencias de ADN.

Los hallazgos recientes demuestran una historia de los cromosomas sexuales sorprendentemente dinámica, marcada por una serie de perturbaciones drásticas en el Y y cambios compensatorios en el X. Esa relación se sigue dando también hoy.

Además, el cromosoma Y —durante largo tiempo considerado un desbarajuste, capaz de hacer poco más que poner en marcha el programa de la masculinidad— resulta que esconde posibilidades insospechadas para la mayoría de los biólogos. A lo largo de más de 300 millones de años se las ha arreglado para conservar un puñado de genes importantes en la supervivencia del macho y para adquirir otros necesarios en el proceso de fecundación. Pese a su aspecto modesto, tiene en sus manos un sorprendente poder.

La investigación sobre la evolución de los cromosomas sexuales humanos partió de la curiosidad científica. Pero no sólo de ésta. Con una aspiración más pragmática se buscaba explicar y revertir la esterilidad del varón. El descubrimiento de genes del cromosoma Y que influyen sobre la capacidad reproductora podría llevar a tratamientos innovadores en el hombre privado de tales

la masculinidad



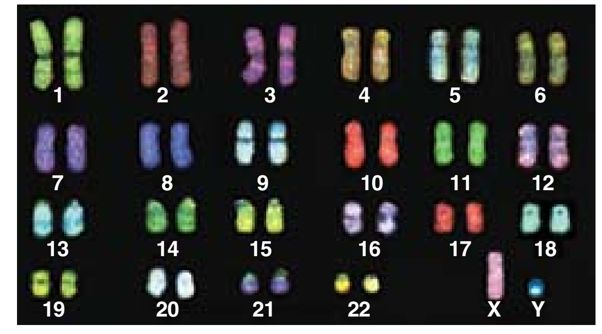
genes o portador de versiones defectuosas de los mismos.

Los avances recientes hunden sus raíces en ideas asentadas 100 años atrás. Antes del siglo XX, los biólogos, observando lo que acontecía en los reptiles, pensaban que el ambiente determinaba el sexo también en el ser humano y en otros mamíferos. Por lo que concierne a los reptiles, la temperatura del embrión en un momento precoz del desarrollo insta la intervención de un sistema, poco conocido todavía, que primará la formación de un macho o una hembra. A comienzos del siglo XX, sin embargo, se dieron cuenta de que en ciertas especies los cromosomas mediaban en la determinación del sexo. Unos veinte años después se vio que los mamíferos estaban entre los que se servían de cromosomas —el X y el Y— para determinar el sexo en el desarrollo embrionario.

Rosario de pruebas

En los decenios siguientes, se halló que el cromosoma Y constituía el marcador del sexo masculino. La investigación dedujo, además, que el X y el Y habían evolucionado a partir de autosomas emparejados de un antepasado común. Por azar, poco antes o inmediatamente después de que surgieran los mamíferos, se produjo una mutación en una pequeña zona de la copia del autosoma que originó el Y, determinando que los embriones heredasen ese cromosoma cambiado (junto con su compañero, el futuro cromosoma X) y nacieran machos. Los embriones que hereda-

1. LOS CROMOSOMAS X e Y fueron, hace millones de años, parejas equivalentes. Pero el cromosoma Y se encogió, en tanto que X mantuvo su integridad. La investigación genética ha empezado a aclarar los pasos que condujeron a la notable disparidad de hoy. Las micrografías muestran los cromosomas tal como aparecen en la metafase de la división celular.

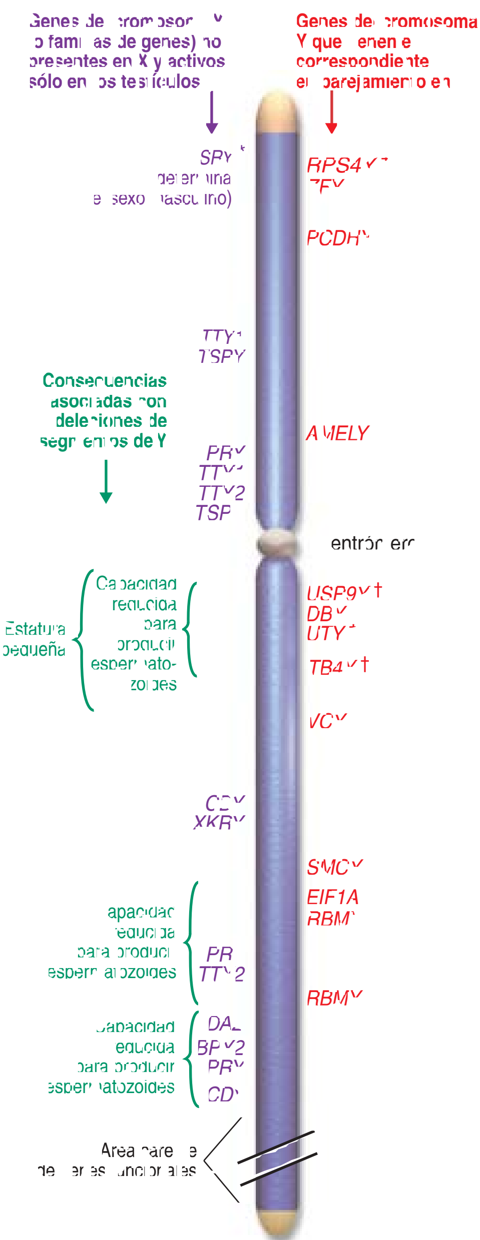


sen los dos cromosomas X serían hembras.

En 1990 los genéticos identificaron la zona del cromosoma Y que confiere masculinidad. Se trata del gen *SRY* (de "sex-determining region Y"). La proteína cifrada por *SRY* insta la formación de los testículos, según parece por la activación de genes de diversos cromosomas. Luego, la testosterona y otras sustancias sintetizadas en los testículos toman las riendas de la configuración de la masculinidad.

Para llegar a la conclusión de que los cromosomas sexuales humanos comenzaron su vida de pareja acoplada, la ciencia se fundaba en los extremos de X e Y, que son un tanto gemelares y aptos para participar en un proceso de recombinación. Durante la meiosis (la división celular que da lugar a espermatozoides y óvulos), los cromosomas emparejados se alinean juntos e intercambian segmentos; después, una copia de cada autosoma más un cromosoma sexual se distribuyen por igual en cada gameto. Aunque ahora la mayor parte del Y se parece poco al X, los extremos de ambos cromosomas se alinean durante la meiosis en los machos e intercambian fragmentos como si X e Y siguieran siendo una pareja. (Esa alineación resulta crucial para la distribución adecuada de los cromosomas en el espermatozoide.)

Que el cromosoma X y el Y fueron un tiempo iguales se corrobora



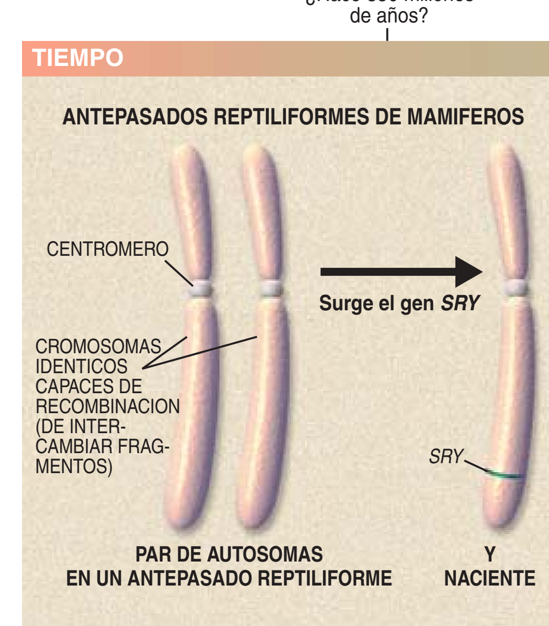
Regiones "pseudoautosómicas", capaces de intercambiar ADN con el cromosoma X

* *SRY* determina la formación de los testículos. Procede del gen *SOX3* y se parece al *SOX3* del cromosoma X, aunque los dos desempeñan funciones distintas

† Genes de administración y cuidado

‡ Genes que tienen su pareja en X y activos sólo en los testículos

2. LOS CROMOSOMAS de una célula de varón (*fotografía*) comprenden 22 pares de autosomas (no implicados en la determinación del sexo), más un cromosoma X y otro Y. De cada par, un miembro procede de la madre y el otro del padre. Los genes de la NRY, región no recombinante del cromosoma Y (*azul en el diagrama*), han permitido trazar la historia evolutiva de X e Y. Como nos dice su nombre, se trata de una región que no puede recombinarse, o intercambiar ADN, con el cromosoma X. Sólo se indican los genes operativos. Aproximadamente la mitad tienen su pareja correspondiente en X (*rojo*); algunos de estos genes cumplen funciones de "administración y cuidado", y son necesarios para la supervivencia de la mayoría de las células. Ciertos genes de la NRY son activos sólo en los testículos (*púrpura*), donde probablemente participan en la fecundidad del varón.

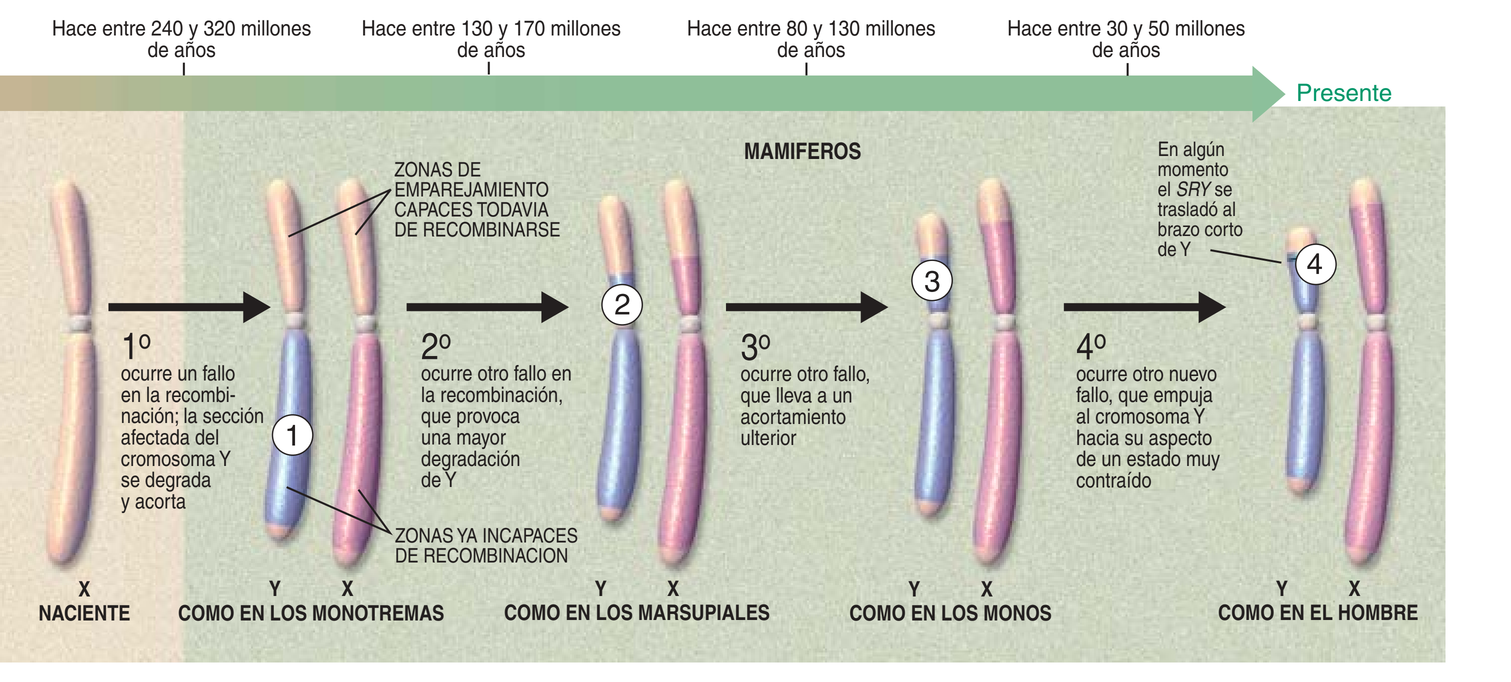


con una prueba más, que atañe a la parte de Y que no se recombina con X. Muchos de los genes distribuidos en la región no recombinante siguen teniendo su equivalente en el cromosoma X.

La existencia de la región no recombinante, que constituye el 95 por ciento de Y, nos ofrecía una pista de cómo ese cromosoma se convirtió en sombra de su entidad originaria. En la naturaleza y en el laboratorio, la recombinación ayuda a mantener la integridad de los cromosomas. Por el contrario, su ausencia provoca que los genes de las regiones no recombinantes acumulen mutaciones destructivas que terminan por degradarlos, si no borrarlos. Parecía razonable pensar, pues, que hubo algo que detuvo el intercambio de partes de X e Y, con el desplome consiguiente de los genes de la región no recombinante del cromosoma Y. Pero transcurrieron decenios sin saberse cuándo y cómo cesó la recombinación después de que surgiera dicho cromosoma.

Conocimiento gradual

El trabajo realizado a lo largo de los últimos cinco años ha venido cubriendo muchos vacíos. En 1999 uno de los autores (Lahn) y David C. Page, del Instituto Whitehead de Investigaciones Biomédicas de Cambridge, demostraron que el cromosoma Y perdió su capacidad de intercambio con el X de una manera gradual e inesperada: primero



3. LA DEGENERACION DEL CROMOSOMA Y conoció cuatro episodios distintos. Comenzó hace unos 300 millones de años, después de que un antepasado reptiliforme adquiriera un gen nuevo (*SRY*) en uno de sus cromosomas autosómicos. En cada uno de los episodios se produjo un fallo de la recombinación (intercambio de ADN) entre el cromosoma X y el Y durante la meiosis, la división celular que origina el espermatozoide y el óvulo. Si la recombinación se bloquea, los genes de las regiones afectadas dejan de funcionar y se degradan. La secuencia que se muestra es muy esquemática. En realidad, el cromosoma Y se expandió temporalmente a veces (enfilando ADN autosómico en zonas todavía capaces de recombinación), antes de que los fracasos de la recombinación condujeran a un acortamiento neto.

implicó un trozo de ADN circundante al gen *SRY* y, luego, se expandió, en bloques separados, por el cromosoma. Pero sólo Y se deterioró en respuesta a la pérdida de la recombinación X-Y; el cromosoma X prosiguió con su recombinación entre sus dos copias en la meiosis de las hembras.

¿A qué se debió el fracaso de la recombinación entre X e Y? Cuando el cromosoma X y el cromosoma Y primitivos se aprestaban a intercambiar segmentos durante la meiosis en un antepasado lejano de los mamíferos modernos, parte del ADN del cromosoma Y sufrió, a buen seguro, una inversión o un giro total con respecto a su parte equivalente en el cromosoma X. Puesto que la recombinación requiere que las dos secuencias de ADN similares se alineen juntas, la inversión suprimiría en adelante cualquier interacción entre las zonas de emparejamientos primitivas de X e Y.

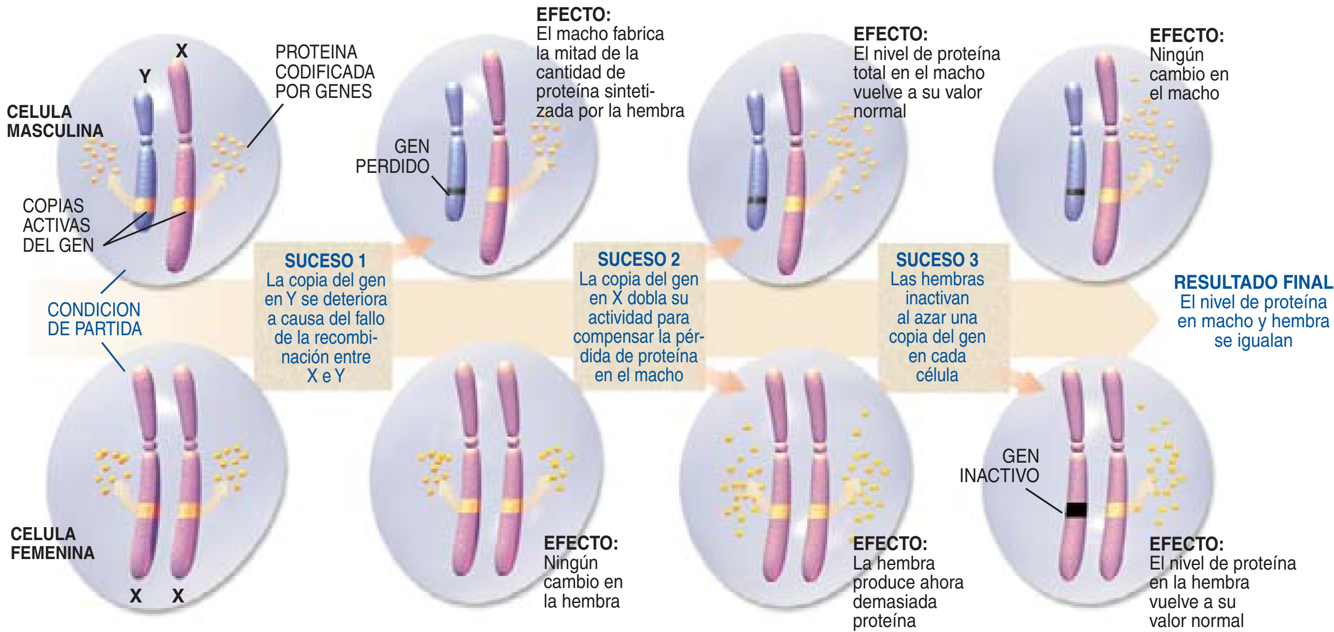
Descubrimos que la recombinación cesó en distintos episodios cuando examinamos las secuencias nucleotídicas de 19 genes que aparecen en la región no recombinante de X y de Y. (Algunas de las copias de Y han dejado de funcionar.) En general, si las copias emparejadas de un gen perdieron su posibilidad de recombinación, la disparidad de las secuencias crecerá con las generaciones. Ante una cifra limitada de diferencias entenderemos que la recombinación cesó recientemente; si el número es elevado, se detuvo hace mucho tiempo.

En su mayoría, los pares X-Y caían en cuatro grupos. Dentro de cada grupo, las copias de X e Y diferían en la misma cuantía, prueba de que la recombinación cesó casi al mismo tiempo. Los grupos se distinguían entre sí con claridad. Las copias de Y que empezaron a divergir de su correspondiente en el cromosoma X casi al tiempo en que surgió el gen *SRY* eran las que más diferían de sus parejas; los otros grupos mostraban una divergencia progresivamente menor entre las copias de X e Y.

Mediante la comparación interespecífica de las secuencias de ADN, los biólogos calculan con bastante aproximación el momento en que los genes emparejados (y, por tanto, las regiones que los alojaban) comenzaron a seguir caminos separados. Aplicado el método a nuestro ámbito se reveló que los precursores autosómicos de X e Y seguían emparejados y persistían intactos en los reptiles que vivieron antes de que la línea de los mamíferos iniciara su proceso de frondosa ramificación. Pero los monotremas (así el ornitorrinco y el equidna), que se numeran entre los primeros en ramificarse de otros mamíferos, poseen el gen *SRY* y una región adyacente no recombinante. De tales diferencias se infería que el gen *SRY* surgió, y se detuvo la recombinación de una región cercana, en un momento cercano a la aparición de los mamíferos, hace unos 300 millones de años.

Nuestro conocimiento acerca de la cronología de los hechos aumentó cuando aplicamos el método del "reloj molecular". En biología se calcula la llamada tasa de variación de fondo, es decir, la velocidad o tasa de variación de las secuencias de ADN cuando no se encuentran so-

KARIN JEGALIAN y BRUCE T. LAHN realizaron su tesis doctoral en el laboratorio de David C. Page, figura eximia de la genética. Jegalian trabaja ahora en el norteamericano Instituto Nacional de la Salud. Lahn, originario de China, es investigador del Instituto Médico Howard Hughes y profesor de la Universidad de Chicago.





4. EVOLUCION DE LA INACTIVACION DE X o silenciamiento de la mayoría de los genes del cromosoma X en las células de una hembra. Según parece, procedió de una forma gradual —un gen o algunos genes a la vez— para compensar la pérdida de genes del cromosoma Y (*diagrama*). En el gato moteado encontramos un efecto de la inactivación de X (*fotografía*). El gen determinante del color de la piel, naranja o negro, se halla en el cromosoma X. Las hembras que llevan la versión naranja en un cromosoma X y la versión negra en el otro X tendrán algunas zonas naranja y otras negras, dependiendo de qué X esté inactivo en cada célula. El responsable de las zonas blancas es un gen diferente.

metidas a una presión especial que les obligue a permanecer inalteradas. Multiplicando la amplitud de la disparidad de la secuencia en los pares X-Y por la tasa calculada, dedujimos que la primera inversión suspensora de la recombinación aconteció hace de 240 a 320 millones de años.

Análisis parecidos señalan que la siguiente inversión ocurrió hace entre 130 y 170 millones de años, poco antes de que surgieran los marsupiales, ramificados de la línea que dio lugar a los mamíferos placentarios. El tercer episodio de inversión se registró hace entre 80 y 130 millones de años, antes de la diversificación de los mamíferos placentarios. Por último, la inversión final se produjo hace entre 30 y 50 millones de años, después de que los simios iniciaran su propia senda evolutiva, aunque antes de que lo hicieran primates y homínidos.

Apeándose de la tendencia general de los pares X-Y, algunos genes de la región no recombinante del cromosoma Y determinan proteínas que difieren sorprendentemente poco de las proteínas cifradas por sus equivalentes en X, incluso en zonas que sufrieron la inversión en momentos muy tempranos. La explicación de la conservación de los mismos se apoya, probablemente, en una ley evolutiva harto simple, según la cual si un gen es crucial para la supervivencia, tenderá a conservarse. En efecto, los genes de Y que menos cambios han experimentado coinciden con los "encargados de la administración de la casa", vale decir, los responsables de mantener la integridad de las células del organismo.

Compensación de pérdidas

La lógica —y un cuerpo sólido de resultados de investigación— nos induce a afirmar que a la recombinación fallida entre el cromosoma X y el Y, con la degradación consiguiente de muchos genes en Y, hubo de sucederle un tercer proceso que compensara la degeneración. ¿Por qué? No todos los genes están activos en todas las células. Ahora bien, cuando una célula necesita determinadas proteínas, activa las copias, maternas y paternas, de los genes correspondientes. La cantidad de proteína sintetizada a partir de cada copia se ajusta con finura a las exigencias de desarrollo del organismo y a su desenvolvimiento diario. Por tanto, cuando los genes del cromosoma Y comenzaron a desaparecer, la producción de las proteínas asociadas habría disminuido catastróficamente en los machos, de no haber logrado las especies afectadas desarrollar algunas mañas compensadoras.

La mosca del vinagre y muchas especies más resuelven ese desequilibrio doblando la actividad de las versiones X de los genes Y perdidos en el macho. Otros animales emplean una estrategia más compleja. Primero refuerzan la actividad de los genes del cromosoma X, lo mismo en el macho que en la hembra; con

ello se colman los niveles de proteína en el macho, aunque se crea un exceso en la hembra. Algunos, como los nemátodos, reducen a la mitad la actividad de los genes de X en la hembra. Otros, mamíferos incluidos, recurren a un proceso de inactivación de X, en cuya virtud las células de embriones tempranos de hembras silencian al azar la mayoría de los genes en uno de sus dos cromosomas X. Las células vecinas podrían silenciar copias de X diferentes, pero todas las descendientes de una determinada célula se acomodarán al mismo patrón de inactivación de X.

Aunque desde hacía tiempo se veía en la inactivación de X una respuesta al deterioro de los genes de Y, carecíamos de pruebas tajantes. Si la degeneración de los genes de Y conducía a la inactivación del cromosoma X, entonces los genes de X dotados de pareja funcional en la región no recombinante de Y continuarían, cabía esperar, operando en las hembras (para evadir la inactivación), de suerte que así se mantuvieran en las hembras niveles de proteína equivalentes a los de los machos. Al analizar los niveles de actividad de los pares X-Y en dos docenas de especies de mamíferos, uno de los autores (Jegalian) y Page descubrieron años atrás que las copias en X de genes funcionales en Y escapaban a la inactivación. Su investigación reveló también que la inactivación de X, aunque hoy sucede en un instante durante el desarrollo del animal, distó mucho de surgir de una forma repentina. Apareció trozo a trozo, quizá gen a gen dentro de un segmento, no de golpe en el cromosoma.

Temas nuevos

Resulta cuando menos llamativo que la región no recombinante del cromosoma Y posea, además de un puñado de genes valiosos, reflejados en el cromosoma X, otra docena que promueve la fecundidad en el macho. Estos genes de la masculinidad determinan sólo proteínas sintetizadas exclusivamente en los testículos, presumiblemente para intervenir en la producción de espermatozoides. Algunos parecen haber saltado hasta el cromosoma Y desde otros cromosomas. De otros genes pudiera decirse que estuvieron en Y desde el comienzo, aunque cumpliendo en su inicio una misión diferente; con el tiempo adquirirían las nuevas funciones. De donde se desprende que la degeneración constituye un asunto mayor en el curso evolutivo seguido por el cromosoma Y. Otra segunda cuestión, apenas atisbada hasta hace poco, se refiere a la adquisición de los genes de fertilidad.

Los teóricos discrepan a propósito de las fuerzas que convierten al cromosoma Y en un imán para esos genes. La especie, en cuanto tal, podría beneficiarse del secuestro en los machos de genes nocivos o inútiles para las hembras. Es también posible que al estar en el Y los genes de la fertilidad se aseguraría su paso de macho a macho sin tener que desviarse a través de las hembras (que podrían desecharlos sin sufrir consecuencias directas).

Esterilidad del varón

Además de revelar la historia de los cromosomas sexuales, los estudios genéticos del cromosoma Y nos permiten conocer las causas de algunos casos de esterilidad. En casi la mitad de las parejas afectadas, el problema reside total o parcialmente en el varón, que produce un número insuficiente de espermatozoides o ninguno en absoluto. A menudo las raíces de estas anomalías permanecen oscuras. Los nuevos hallazgos revelan, sin embargo, que el cromosoma Y contiene genes de fertilidad y que la alteración de uno o varios explica por qué alrededor del 10 por ciento de los hombres producen escasos espermatozoides o incluso ninguno.

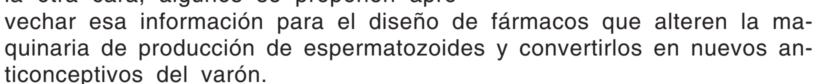
En los años setenta, tras observar al microscopio que muchos varones estériles carecían de pequeños fragmentos del cromosoma Y, presentes por norma en los fértiles, se dedujo la responsabilidad de dicho cromosoma en la infecundidad. Sabemos hoy que las deleciones en una cualquiera de tres regiones específicas del Y provocan esterilidad. Se trata de las regiones AZF (por factor de azoospermia) a, b y c. Cada una de ellas contiene múltiples genes.

En su mayoría, tales genes se muestran muy activos en los testículos, donde se producen los espermatozoides. (Los genes fabrican en cantidades abundantes las proteínas que codifican.) De semejante comportamiento se desprende la importancia de los genes de las regiones AZF para la formación de fluido seminal, aunque se desconoce su contribución exacta, así como la interacción de los mismos con genes de la fecundidad de otros cromosomas.

Algunos andrólogos introducen ya las deleciones del cromosoma Y en valoración diagnóstica. Si los varones que sufren esas deleciones producen al menos algunos espermatozoides, podrían someterse a una terapia de inyección espermática citoplasmática (ICSI), en que se recoge semen de los testículos y se inyecta en el ovocito en el laboratorio. Pero los hijos así concebidos heredarán los cromosomas Y defectuosos y padecerán probablemente los mismos problemas de esterilidad.

LA INYECCION del espermatozoide (*visible en la microaguja*) directamente en un óvulo puede vencer la esterilidad en varones afectados por mutaciones en el cromosoma Y.

Una vez se descifren las funciones exactas de las proteínas codificadas por los genes de la zona AZF, podría quizá repararse la esterilidad de los varones con deleciones en el cromosoma Y, mediante la restauración de los genes perdidos y la aportación consiguiente de las proteínas necesarias. Vistas las cosas desde la otra cara, algunos se proponen aprovechar esa información para el diseño de fármacos que alteren la maquinaria de producción de espermatozoides y convertirlos en nuevos anticonceptivos del varón.



—K.J. y B.T.L.

¿Cómo pueden los genes de la fertilidad prosperar en ausencia de recombinación, bajo las mismas condiciones que arruinaron a la mayoría de los restantes genes del cromosoma Y? La respuesta podría esconderse tras la observación siguiente: la inmensa mayoría de los genes de fertilidad presenta múltiples copias en el cromosoma Y. Semejante multiplicidad puede servir de tampón contra los efectos de mutaciones destructivas, que acostumbran afectar sólo a una copia por vez. Algunas copias acumulan mutaciones y terminan por fracasar, en tanto que las restantes siguen cuidando la capacidad reproductora del hombre y sirven de simiente para su propia multiplicación.

La evolución de los cromosomas sexuales se ha estudiado a fondo en el hombre. De su comparación con los trabajos acometidos en otras especies han aflorado una serie de principios generales que operan incluso en animales cuyos cromosomas sexuales siguieron un curso evolutivo distinto del expuesto a propósito de los mamíferos. Aves y mariposas usan el sistema W-Z de determinación del sexo. Cuando la herencia de una sola copia de un cromosoma específico induce la formación de un macho, a ese cromosoma se le llama Y, y a su pareja X. Cuando la herencia de una sola copia de un cromosoma promueve la formación de una hembra, a ese cromosoma se le denomina W, y a su pareja Z.

Un principio importante es que los cromosomas sexuales proceden de los autosomas. Pero los autosomas concernidos pueden variar. En las aves los cromosomas W y Z surgieron de autosomas distintos de los que dieron lugar a X e Y en los mamíferos. Por su parte, los cromosomas X e Y de la mosca del vinagre se originaron a partir de autosomas diferentes de los que dieron lugar a esos cromosomas en los seres humanos.

En la mayoría de las especies que se reproducen por vía sexual, una vez que surgieron los cromosomas sexuales, éstos comenzaron a adquirir rasgos muy peculiares a medida que sufrieron uno o más ciclos de tres pasos secuenciales: supresión de la recombinación, degeneración de las regiones no recombinantes del cromosoma específico del sexo (el Y o el W) y, por último, la compensación por parte del otro cromosoma. Al mismo tiempo, el cromosoma específico del sexo devino importante para la fecundidad, como sucedió con el cromosoma Y en el hombre y en los insectos.

Es razonable preguntarse por el futuro que le aguarda a nuestra especie. ¿Podría continuar el ciclo hasta desaparecer toda recombinación entre el cromosoma X y el Y, hasta la destrucción final de Y, quizá dentro de millones de años? Los descubrimientos recientes insinúan que los machos están capacitados para proteger sus genes del cromosoma Y que resultan decisivos para la supervivencia y la fecundidad del varón. Ello no obstante, la degradación total del cromosoma Y sigue ahí como una posibilidad teórica.

Muy a menudo, se emprende una investigación génica con la mirada puesta en alguna enfermedad, para conocerla a fondo y repararla si se puede. Así se acometieron varios trabajos sobre el cromosoma Y, que buscaban comprender el desarrollo y la corrección de la esterilidad. A un buen número de estudios, sin embargo, les preocupaba menos la posible terapéutica. Conforme se iban identificando más genes de los cromosomas X e Y, gracias a la investigación médica y a una secuenciación sistemática, los científicos no se resistieron a plantear una cuestión más básica, la de si esos genes aportaban alguna novedad sobre el pasado remoto de ese extraño desemparejamiento entre el cromosoma X y el Y. Ahora vemos, en efecto, que los genes tenían una maravillosa historia que contarnos.

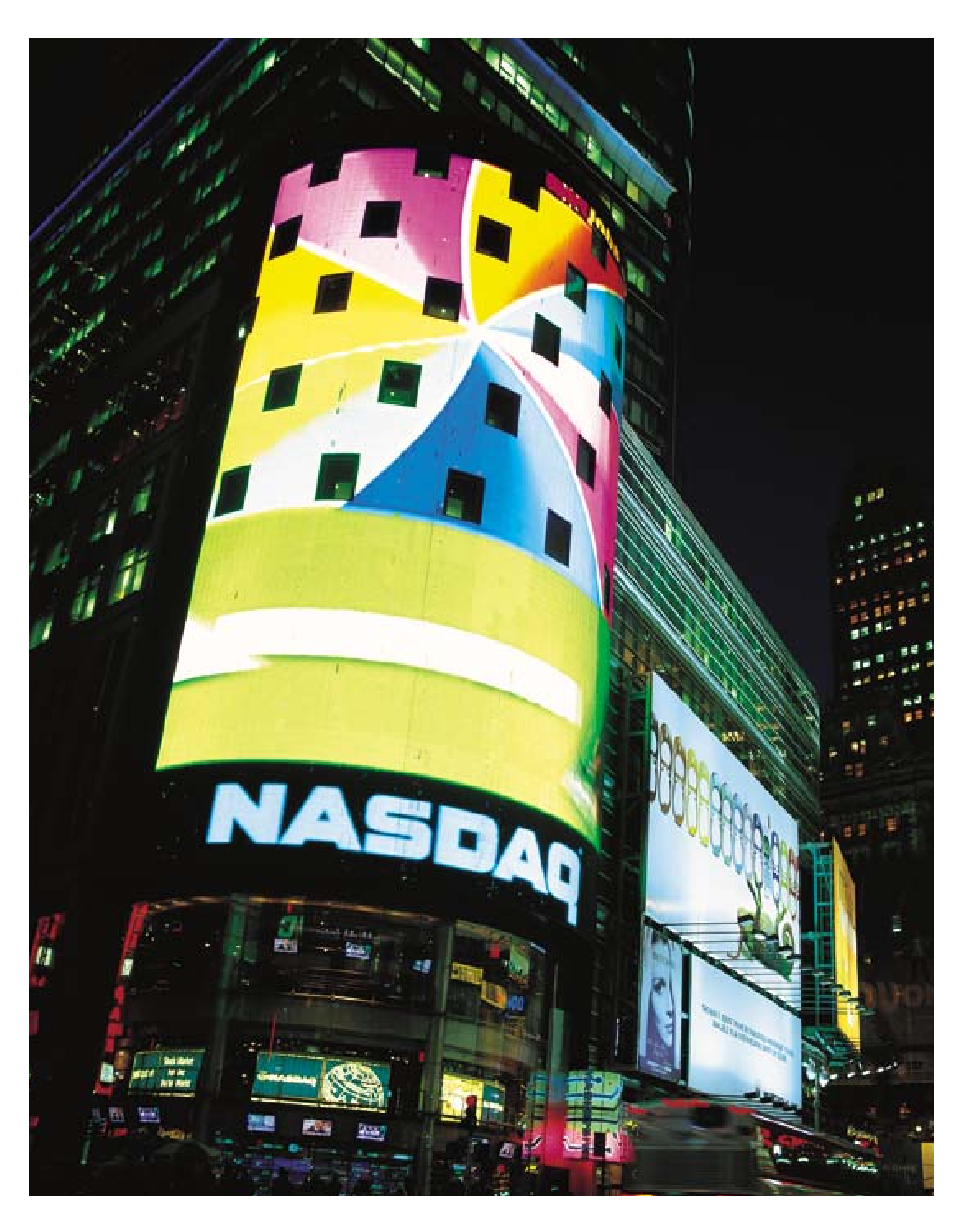
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FUNCTIONAL COHERENCE OF THE HUMAN Y CHROMOSOME. Bruce T. Lahn y David C. Page en *Science*, vol. 278, págs. 675-680; 24 de octubre de 1997.

A PROPOSED PATH BY WHICH GENES COMMON TO MAMMALIAN X AND Y CROMOSOMES EVOLVE TO BECOME X INACTIVATED. Karin Jegalian y David C. Page en *Nature*, vol. 394, págs. 776-780; 20 de agosto de 1998.

FOUR EVOLUTIONARY STRATA ON THE HUMAN X CHROMOSOME. Bruce T. Lahn y David C. Page en *Science*, vol. 286, págs. 964-967; 29 de octubre de 1999.

THE HUMAN Y CHROMOSOME IN EVOLUTION'S LIGHT. Bruce T. Lahn, Nathaniel M. Pearson y Karin Jegalian en *Nature Reviews Genetics* (en prensa).


NASDAQ

DIODOS EMISORES DE LUZ

Los de espectro completo gozan ya de amplia difusión. Ahora se trata de desarrollar versiones de luz blanca, que sustituyan a la centenaria bombilla de filamento incandescente de Edison

M. George Craford, Nick Holonyak, Jr., y Frederick A. Kish, Jr.

En 1995, durante la ceremonia en que Holonyak, coautor y maestro de los otros firmantes de este artículo, recibía el premio Japón por su labor pionera en el campo de los emisores de luz y láseres semiconductores, se le pidió al galardonado que dijera algunas palabras sobre la técnica del futuro. Holonyak se limitó a señalar las luces del techo y expresó lacónico: "Eso desaparecerá".

Unos ingenios semiconductores, los diodos emisores de luz, o LED, están provocando, literalmente, una revolución delante de nuestros ojos. Aunque su manifestación más frecuente son los indicadores luminosos rojos y verdes de los aparatos electrónicos, están empezando a sustituir a las bombillas incandescentes en numerosas aplicaciones. ¿Por qué? Los LED convierten la electricidad en luz cromática de una manera mucho más eficiente que sus primas incandescentes. En el caso de la luz roja el rendimiento se decuplica. Sólidos y compactos, algunos prototipos duran la increíble cifra de 100.000 horas, unos diez años de uso normal, mientras que la vida media de una bombilla incandescente se cifra en unas 1000 horas. No sólo eso; la intensidad y los colores de la luz generada por los LED han mejorado tanto, que se han convertido en la fuente de luz adecuada para grandes pantallas. El ejemplo más impresionante nos lo ofrece el panel de ocho pisos de altura del Nasdaq, situado en la neoyorquina Times Square.

Los ingenieros se afanan ahora en la manera de recortar los costes de fabricación, multiplicar su rendimiento y ampliar la gama de colores útiles. Nada impide combinar la luz generada por LED rojos, azules y verdes para producir luz blanca. Y en ese logro, óptimo, tiene la industria fijada su mirada. Alcanzarlo supondría para la industria la fabricación de un nuevo producto popular y barato, capaz de sustituir a la bombilla incandescente, transcurridos más de cien años desde que Thomas Edison la inventara.

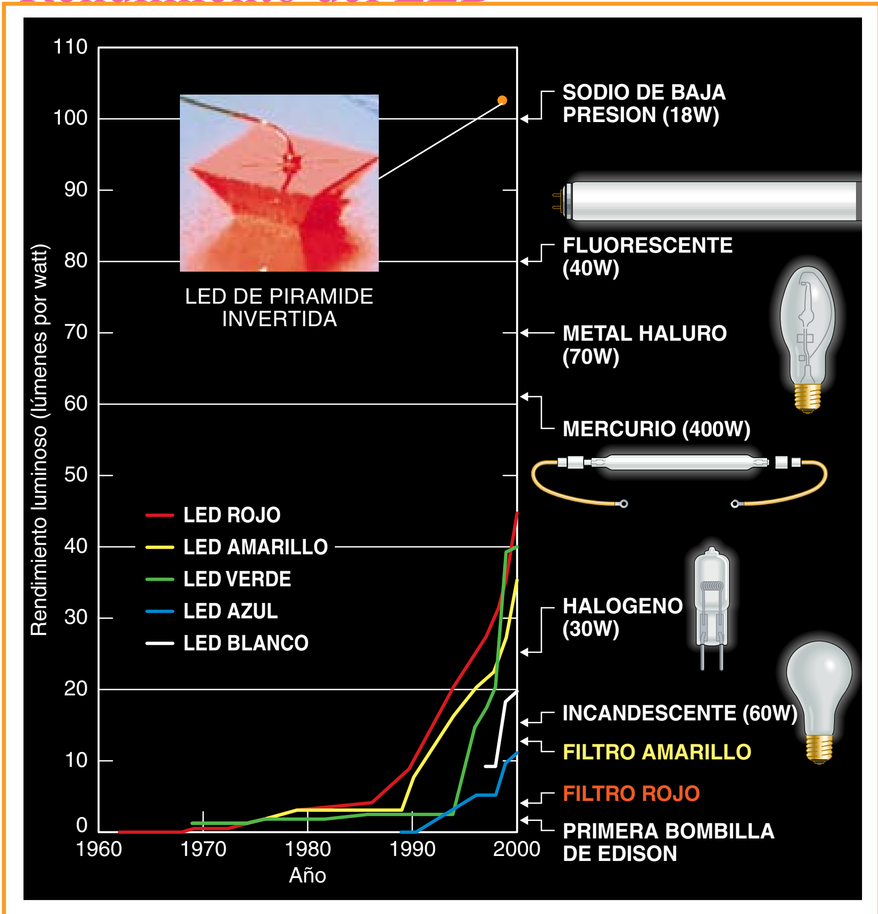
En ciertas aplicaciones los diodos fotoemisores han empezado ya a reemplazar a las bombillas. Si dejamos de lado la pantalla del Nasdaq, los automovilistas han sido los más favorecidos por los nuevos cambios. Entre el 60 y el 70 por ciento de los coches fabricados en Europa utilizan el LED en la tercera luz de freno, dirección en la que avanzan los Estados Unidos. También se emplean en los pilotos traseros y en los intermitentes, así como en pilotos laterales de camiones y autobuses. De aquí a 10 años, la iluminación roja y ámbar de los focos de los coches se apoyará, a buen seguro, en la técnica de los diodos fotoemisores. Se están introduciendo LED mayores y más potentes para el rojo de los semáforos. Aproximadamente el 10 por ciento de los semáforos de Estados Unidos portan esos diodos.

Lo acostumbrado hasta ahora era recurrir a las bombillas incandescentes para las señales de tráfico y otras lámparas cromáticas. Con ese fin las bombillas se cubrían con un filtro que les diera el color deseado. El filtrado constituye un método sumamente tosco de producir luz. Un filtro rojo, por ejemplo, bloquea en torno al 80 por ciento del resplandor; la cantidad de luz emitida se reduce de 17 lúmenes por watt a entre tres y cinco lúmenes por watt.

Aunque comparado con el método del filtrado, el coste de cada lumen (unidad de flujo luminoso en el sistema internacional) generado por un semáforo con diodos fotoemisores resultaría mayor, los lúmenes serían todos del color adecuado. Además, los LED de un semáforo sólo consumen de 10 a 25 watt, mientras que, para conseguir un brillo similar con bombillas incandescentes, se requieren de 50 a 150 watt. Merced a ese ahorro energético, la diferencia de coste por lumen se recupera en menos de un año. Cuando se toma en cuenta ese dato, al que hemos de añadir un mantenimiento mínimo con el recorte consiguiente en nóminas, se entiende la razón

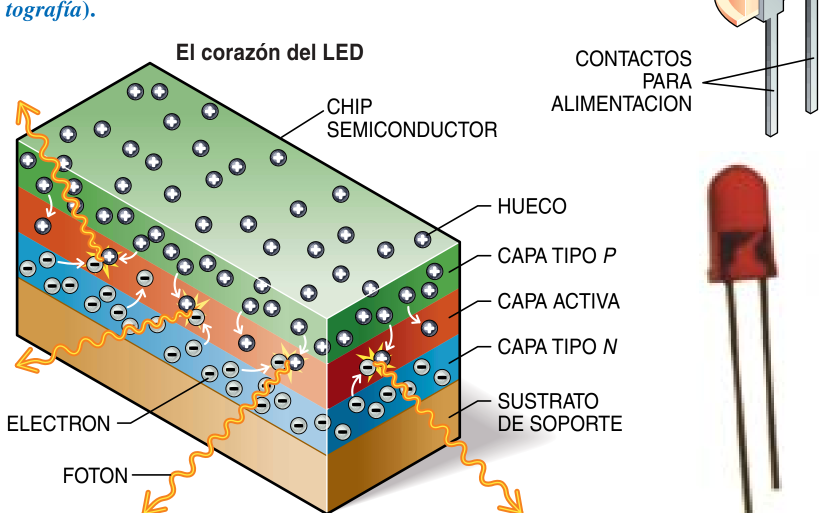
1. TORRE DEL MERCADO DE VALORES NASDAQ, la mayor videopantalla del mundo. Utiliza 18.677.760 diodos fotoemisores que barren 998 metros cuadrados.

Rendimiento del LED



2. LOS DIODOS FOTOEMISORES han mejorado sin cesar hasta superar el rendimiento de otros tipos de luz; el mejor es el prototipo de un LED rojo anaranjado con forma de pirámide invertida.

3. EL CHIP SEMICONDUCTOR es la clave del brillo del diodo fotoemisor. Al aplicar una diferencia de potencial se provoca el salto de "huecos" (cargas positivas) desde la capa de tipo *p*, y de electrones desde la capa de tipo *n*, hacia la capa activa. Al encontrarse ambas cargas se generan fotones, cuyo color depende de la composición química de las diferentes capas, aunque algunos fabricantes encierran el LED dentro de una lente coloreada para su identificación (*véase la fotografía*).



de la popularidad de los LED en el dominio de la planificación urbana.

Con la aparición reciente de modelos de gran intensidad que cubren toda la gama de colores, los diodos emisores de luz han entrado en el diseño de interiores. Puesto que cada LED lleva asociado un color, el usuario controla el espectro entero. Ajustando la asociación de LED de diferentes colores, se consigue regular el tono luminoso. Podemos rebajar, por ejemplo, la luz blanca, obtenida por combinación de LED rojos, verdes y azules, si apagamos una fracción de los fotodiodos rojos e intensificamos los azules.

Tamaña flexibilidad abre el camino a nuevas aplicaciones. En vez de cambiar el papel de la pared o pintarla de un color diferente, podemos manipular el color de la estancia ajustando la proporción de la longitud de onda de la luz emitida (la longitud de onda de la luz determina el color). En el Museo Metropolitano de Arte de Nueva York se utilizó, en 1999, luz generada por LED para la iluminar una exposición sobre la indumentaria de los Beatles en *Sgt. Pepper´s*. (Este tipo de iluminación produce menos calor y no estropea las telas.) Los fotógrafos, por su parte, dispondrán también de un completo control de los focos sin necesidad de manipular engorrosos filtros o geles.

Los diodos emisores presentan sugerentes posibilidades para la medicina. Sus bajas temperaturas, el control sobre la longitud de onda y la dispersión de la luz permiten, por ejemplo, que los oncólogos estudien mejor el tratamiento fotodinámico de los tumores. En este tratamiento se les suministra a los pacientes un fármaco fotosensible, absorbido de manera preferente por las células cancerosas. Cuando la luz de la longitud de onda adecuada incide sobre el fármaco, éste se excita y destruye la célula. Mediante cadenas de LED puede conseguirse un frente homogéneo de luz que estimule los fármacos fotosensibles sin quemar la piel del paciente.

Desde cerca

Para examinar con detalle los diodos emisores de luz, basta fijarse en los que componen el piloto rojo de una bicicleta. Al abrir la cubierta se observa un par de baterías de tipo AA conectadas a una placa en la que hay varias prominencias claras, incoloras y cilíndricas, de unos ocho milímetros de altura por cinco de anchura. Cada prominencia transparente constituye un diodo fotoemisor. Al pulsar el botón

de encendido, el LED se torna rojo y produce un brillante haz de luz, que, si se mira directamente, puede incluso provocar dolor. Una vez apagado, se distingue un filamento metálico que atraviesa su base; veremos también una tacita en miniatura que medio sobresale. La tacita es un reflector, que sostiene un chip semiconductor del tamaño de un grano de arena. En el chip se esconde el corazón del LED.

Dentro del chip hay una capa con un exceso de electrones, la capa de tipo *n* (de “negativo”). Encima, aunque no contigua, hay otra capa hecha de un material con penuria de electrones; los ingenieros eléctricos prefieren hablar de un exceso de partículas con carga positiva o huecos. Este material es de tipo *p* (de “positivo”). Entre las capas *n* y *p* media la capa activa, desde donde se emite la luz.



4. LOS LED BLANCOS son ya una realidad, pero faltan todavía diez años para que alumbren nuestros hogares a un precio razonable.

Al aplicar un voltaje se introducen electrones y huecos en la capa activa. Allí terminan por encontrarse mutuamente. Al unirse se emiten fotones (unidad básica de la luz). La estructura atómica de la capa activa y los materiales que la rodean determinan el número de fotones producidos y su longitud de onda.

En los primeros prototipos de diodos fotoemisores, fabricados en los años sesenta mediante la combinación de galio, arsénico y fósforo para obtener luz roja, la unión de electrones y huecos resultaba bastante ineficiente: por cada 1000 electrones se generaba un solo fotón rojo. Estos LED producían una décima parte de la luz despedida por una bombilla incandescente filtrada en rojo y alimentada con la misma potencia.

Con el paso del tiempo se mejoró el rendimiento, sobre todo en el extremo rojo del espectro. En 1999 el grupo encabezado por Michael Krames consiguió batir en Hewlett-Packard el récord de rendimiento, al crear diodos emisores que transforman en fotones de longitud de onda del rojo más del 55 por ciento de los electrones introducidos. Dicho avance se debió, sobre todo, a un incesante progreso de la calidad del material empleado y al desarrollo de sustancias que posibilitan una transformación óptima de electrones y huecos en fotones. Uno de los mayores impulsos al rendimiento se dio cuando los científicos descubrieron que los materiales no tenían que ser necesariamente homogéneos. Antes bien, cada capa podía presentar una composición química diferente, de suerte que, cuando se instalaran junto a la capa activa, confinaran mejor los electrones y los huecos y, por lo tanto, aumentara la probabilidad de que un electrón y un hueco se combinaran para producir luz.

Los investigadores han aprendido a ajustar las propiedades de las capas semiconductoras. Pueden modificar la composición del material del que está formada la capa activa y dopar las otras con impurezas. El dopaje altera las características de tipo *n* y tipo *p* de las capas semiconductoras. Por ceñirnos al modelo más sencillo, consideremos el silicio, elemento perteneciente al grupo IV de la tabla periódica; tiene cuatro electrones disponibles para establecer enlaces con otros átomos. En su configuración cristalina, cada átomo comparte electrones con los átomos adyacentes. Cuando se agrega al cristal de silicio un pequeño número de átomos del grupo III (lo que quiere decir que contienen tres electrones en la capa energética externa, como puede ser el boro), la estructura resultante muestra un número insu-

Diodos fotoemisores y láseres

Aunque alguien pudiera confundir los diodos fotoemisores con los diodos láser —ambos están hechos de materiales semiconductores—, difieren en su estructura, se comportan de manera distinta y cumplen funciones dispares.

El diodo láser adquiere la forma de un material semiconductor entre lo que es, en esencia, un par de espejos. Se denomina cavidad de resonancia la zona que se encuentra entre los espejos. Cuando el flujo eléctrico atraviesa el semiconductor, éste emite fotones que rebotan de un lado a otro dentro de la cavidad, excitando a otros pares electrón-hueco para que así generen nuevos fotones con la misma longitud de onda. La intensidad de la luz generada incrementa de una forma incesante y los fotones marchan en coordinación mientras oscilan entre los espejos. Parte de los fotones se escaparán de la cavidad si uno de los espejos permite la salida de una porción de la luz. Dado que todos tienen la misma longitud de onda y se encuentran en la misma fase, generan una columna angostísima de luz pura y brillante, con una misma longitud de onda. En términos físicos los fotones son coherentes.



LA LECTURA de códigos de barras se realiza mediante láseres semiconductores.

Este haz luminoso tan definido constituye una de las características del láser. Recuerda al escalpelo: afilado, fino y, en condiciones ópticas propicias, con capacidad de realizar operaciones delicadas, como la de reconocer las delgadas pistas de un disco compacto o de leer los códigos de barras en la caja registradora.

En comparación, la luz de un diodo fotoemisor, dotado de amplia dispersión, se parece al tamborileo de la lluvia. Al no estar los LED en una cavidad adecuada (no se halla entre espejos), los fotones que emiten carecen, en cierto sentido, de coherencia. La luz no sale en una columna unidireccional, sino que sigue un patrón más ancho y difuso, compuesto de una amplia gama de longitudes de onda procedentes de una zona del espectro. Los fotones producidos por el diodo fotoemisor pueden no tener la misma longitud de onda, aunque se encuentran tan cerca unos de otros que el ojo humano los percibe de un solo color.

—*M.G.C., N.H.* y *F.A.K.*

M. GEORGE CRAFORD, NICK HOLONYAK, JR., y FREDERICK A. KISH, JR., han sido galardonados en numerosas ocasiones por su trabajo en diodos emisores de luz. Craford, que desarrolló el primer LED amarillo, dirige la división técnica de LumiLeds Lighting, empresa con sede en la californiana San José creada por las compañías Philips y Agilent Technologies para la búsqueda de nuevas aplicaciones de los LED. A Holonyak, discípulo de John Bardeen y profesor de física e ingeniería en la Universidad de Illinois, se le considera el inventor del primer LED aplicado: el LED rojo de arseniuro fosfuro de galio. Kish está al frente del departamento de investigación y desarrollo de Agilent Technologies. Allí fue uno de los principales investigadores de una nueva familia de LED rojo-amarillo-anaranjados de alta luminosidad, que superaron el rendimiento de las bombillas incandescentes sin filtros.

ficiente de enlaces para compartir con los átomos de silicio vecinos. Aparecen posiciones libres donde debería haber un electrón, generándose huecos y dando lugar a un material de tipo *p*.

En el polo opuesto, los elementos que pertenecen al grupo V de la tabla periódica, así el fósforo, tienen un electrón más en el nivel de energía más alejado del núcleo. Al dopar el silicio con fósforo, el cristal adquiere un exceso de electrones, dando lugar a un material de tipo *n*.

En los diodos fotoemisores, el cristal no suele ser silicio sino una mezcla de elementos de los grupos III y V. Si se realiza un estricto control de las concentraciones de aluminio, galio, indio y fósforo, y se añaden los dopantes adecuados, telurio y magnesio por lo común, se controla la generación de las capas tipo *p* y tipo *n*; de ese modo se fabrican diodos que emiten en la longitud de onda del rojo, del naranja o del amarillo. A principios de los setenta, los LED rojos que contenían arseniuro fosfuro de galio brillaban lo suficiente como para alumbrar las primeras calculadoras y relojes digitales.

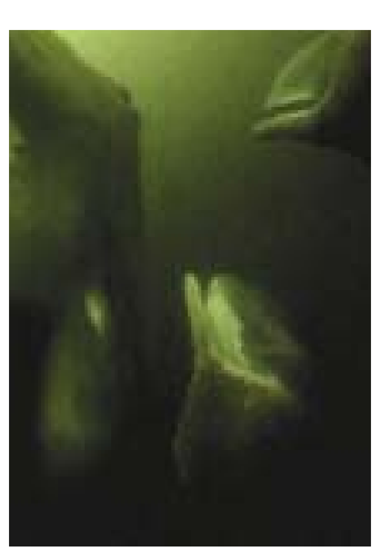
Con el progreso de las técnicas de fabricación se han creado cristales lisos y prácticos, que han dejado atrás sistemas defectuosos e irregulares. De ello se han beneficiado los dispositivos fotoemisores. En efecto, las redes atómicas de los materiales de tipo *p* y tipo *n* deben ser compatibles con la del sustrato y con la de la capa activa. Se consigue esta coherencia mediante la deposición en fase vapor, método de fabricación que se basa en la canalización de gases calientes sobre el sustrato para obtener una película muy fina. Monsanto comenzó a aplicar esa técnica a finales de los años sesenta para la fabricación en masa de diodos. En 1977, Russell D. Dupuis, hoy en la Universidad de Texas, demostró que, si se modificaba el proceso de deposición de suerte tal que se utilizaran gases a bajas temperaturas sobre un sustrato caliente, se obtenían láseres semiconductores. Este pro-

Los diodos fotoemisores alumbran las profundidades

Greg Marshall, biólogo marino, hubo de sortear varios problemas cuando se propuso grabar a los cachalotes y otros animales que se sumergen hasta niveles muy profundos. A centenares de metros bajo el nivel del mar, donde bajan, reina la obscuridad y son enormes las presiones. Para complicar más el trabajo, cualquier tipo de luz visible afecta a los animales, atrayéndolos o ahuyéntandolos, a ellos y a sus presas. Si se altera con luz subacuática ordinaria el comportamiento normal de los cachalotes, se compromete el objetivo final del proyecto.

La solución: LED compactos que emiten luz a una longitud de onda próxima al infrarrojo, "visible" por la cinta de vídeo pero no por los animales. Al introducir el diodo en un cilindro metálico endurecido con forma de torpedo, en el que se ha instalado una cámara automática, el aparato funciona como un foco invisible, iluminando los objetos a dos o tres metros de distancia, sin incidir en el comportamiento del cachalote.

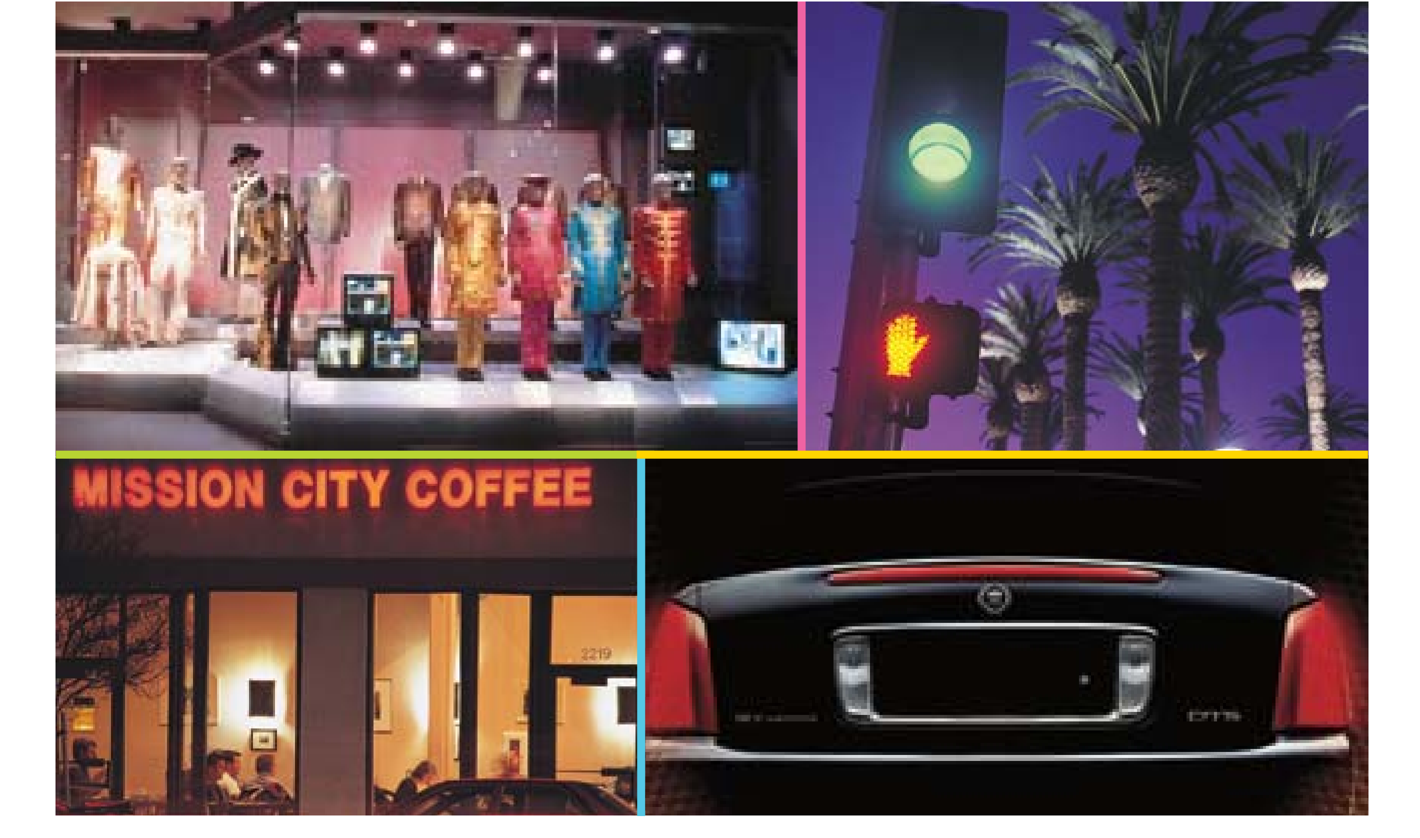
El tamaño minúsculo de los LED dejaba sitio para los registradores de sonidos, cronos, medidores de la profundidad y la duración de la inmersión, dirección, temperatura y velocidad. El paquete de la cámara automática, que recibe el nombre de Crittercam, es muy pequeño y puede instalarse en el dorso de ballenas, focas, delfines, pingüinos, leones marinos y otros animales marinos; el científico observa así el mar desde el punto de vista de una ballena. Después de rodar, un dispositivo de control de tiempo libera la Crittercam, que sube a la superficie para ser recuperada, junto con su valioso metraje.



CACHALOTES observados desde una Crittercam, con luz generada por LED.

La Crittercam constituye el fruto de 14 años de experimentos, muchos de los cuales buscaban una fuente luminosa adecuada. Ante la aparición comercial de los primeros LED azules, hace unos cuatro años, Marshall adquirió uno de los primeros directamente de la fábrica japonesa. (Por desgracia, aunque los LED de longitud de onda azul penetraban en la penumbra de las profundidades oceánicas, la luz que generaban era demasiado visible para los animales. La zona próxima a los infrarrojos se convirtió en la opción seleccionada. En definitiva: la selección de la longitud de onda es importante, lo que supone una ventaja cuando se trata de LED.)

El esfuerzo de Marshall tuvo su recompensa. Observar el metraje obtenido de una Crittercam puesta en la aleta dorsal de un tiburón es una experiencia excitante. También ha permitido que los biólogos marinos puedan observar comportamientos nunca vistos, tales como focas haciendo burbujas y cantando bajo el agua durante los rituales de cortejo.



5. ENTRE LAS APLICACIONES de los LED se incluyen las siguientes (*en el sentido de las agujas del reloj, empezando por la esquina superior izquierda*): luces para exhibiciones, tales como las utilizadas para iluminar los trajes de los Beatles en *Sgt. Pepper´s*, en el Museo Metropolitano de Arte de Nueva York; semáforos; luces traseras e intermitentes de los coches, y luces de exteriores.

ceso, que permite el crecimiento de una mayor variedad de materiales, se aplica ahora para producir diodos fotoemisores de alta calidad. Shuji Nakamura, actualmente en la Universidad de California en Santa Bárbara, modificó, a su vez, el proceso para fabricar cristales de nitruro de galio de óptima calidad, capacitados para la iluminación en luz azul.

A mediados de los años noventa, un grupo de Hewlett-Packard encontró un nuevo método para aumentar el brillo de los LED: reconfigurar el chip. A través de una manipulación delicada, se retira la oblea original de arseniuro de galio sobre la cual crece la capa activa, se la sustituye por otra oblea transparente de fosfuro de galio y se esculpe un LED con forma de pirámide invertida. Esta geometría reduce el número de reflexiones internas e incrementa, por ende, la cantidad de luz que despide el chip.

La gran esperanza

Gracias a estas mejoras en color y brillo, los investigadores han empezado a apuntar hacia la producción de LED blancos de gran intensidad. En el mercado se venden ya diodos fotoemisores blancos de baja potencia cuyo rendimiento supera algo el de las bombillas incandescentes, pero los de alta potencia resultan todavía prohibitivos por su alto precio. Las ventajas de este tipo de luz, una vez que se consiga fabricarlos en masa, son enormes. Los usuarios abandonarán las frágiles bombillas de vidrio rellenas de gas, que se queman muy pronto y desperdician, en forma de calor, gran parte de la energía que se les proporciona, para comprar luces de larga duración, basadas en técnicas de estado sólido. En los automóviles, por ejemplo, los diodos fotoemisores persistirían a lo largo de la vida del coche. Y dado que su consumo es mínimo, se podría aprovechar más energía de la batería para los instrumentos electrónicos de control.

De sus ventajas se beneficiaría la propia sociedad. Entre el 20 y el 30 por ciento la electricidad generada en los EE.UU. se dedica al alumbrado. Ahora bien, ni siquiera los mejores sistemas empleados logran convertir más del 25 por ciento de la electricidad en luz. Si se consiguieran LED blancos con una eficiencia similar a la que tienen hoy los diodos fotoemisores rojos, podríamos reducir la demanda energética y recortar en unos 300 millones de toneladas al año la cantidad de dióxido de carbono expulsado a la atmósfera.

La primera empresa que fabrique en masa LED blancos de gran intensidad se hará con el mercado mundial del alumbrado, cifrado en 12.000 millones de dólares. Ante semejante perspectiva, Philips, Osram Sylvania y General Electric están invirtiendo muchísimo dinero en la investigación y desarrollo de la técnica LED; con el mismo aliciente aparecen nuevas empresas, tales como LumiLeds, un consorcio entre Philips y Agilent Technologies, cuyos asuntos técnicos dirige Craford, uno de los autores.

Los diodos fotoemisores blancos de baja potencia se utilizan ya en la iluminación de fondo de los teléfonos móviles y en los semáforos. Se están introduciendo los de gran potencia (o de segunda generación) en la iluminación de paisajes y monumentos. Pero no se prevé que en los próximos 10 o 20 años se realice una sustitución a gran escala de las lámparas de uso común, dada la dificultad que entraña la fabricación de diodos fotoemisores blancos eficientes a un precio competitivo.

Podemos reducir a dos los métodos principales de generar luz blanca mediante diodos fotoemisores. Consiste el primero en combinar la emisión de LED rojos, verdes y azules, basándonos en la teoría de la suma de

colores. El inconveniente de esta técnica reside en la dificultad de combinar la luz generada por varios LED de una manera eficiente, uniforme y controlada.

El segundo método se basa en la excitación de un material fosforescente mediante los fotones de un LED. Así, podemos rodear un diodo fotoemisor azul con un material fosforescente amarillo. Cuando la energía generada por el diodo incide en el material fosforescente, éste se excita y brilla con luz amarilla, que se mezcla con la azul del LED y produce luz blanca. Otra posibilidad es la de utilizar un diodo ultravioleta para excitar una mezcla constituida por materiales fosforescentes rojos, verdes y azules, de manera que se genera luz blanca. Este proceso, similar al de los tubos fosforescentes, es más sencillo que la mezcla de tres colores, pero adolece de limitaciones intrínsecas debidas a las pérdidas en la conversión de luz ultravioleta o azul en luz de menor energía (es decir, luz más próxima al segmento rojo del espectro). Agréguense a ello las mermas de luz causadas por la dispersión y absorción que tienen lugar en la cubierta fosforescente.

Sea cual sea la opción seguida —ambas podrían tomarse a tenor de la aplicación buscada—, los factores determinantes serán la reducción sustancial de los costes de producción y la mejora del rendimiento. Y podría incluso pasar algún tiempo antes de que los consumidores aceptaran los LED, cuyo mayor coste inicial se amortiza en el intervalo de diez años. Con un precio al alza de la energía y con la amenaza apremiante del calentamiento de la Tierra aumentará el atractivo de los LED. En el horizonte parece verse una luz para nuestros problemas energéticos y ambientales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WE WERE BURNING: JAPANESE ENTREPRENEURS AND THE FORGING OF THE ELECTRONIC AGE. Bob Johnstone. Basic Books, 1999.

REPLACING THE LIGHT BULB. Charles T. Whipple en *Photonics Spectra*, vol. 33, n.º 12, págs. 104-109; diciembre 1999.

LED LIGHT THE FUTURE. Neil Savage en *Technology Review*, vol. 103, n.º 5, págs. 38-44; septiembre/octubre 2000.

La protección



del agua

Una gota, un hilo, un chorro. El agua constituye una bendición para nuestro planeta envuelto por océanos. Por desgracia, el 97 por ciento de la misma es salada, y la parte que no lo es está en muy buena medida encerrada en el hielo. Por eso se han tenido que empeñar el ingenio y el tesón del hombre a lo largo de la historia para conseguir un suministro adecuado de agua dulce. El agua ha sido el botín (y a veces el detonante) en conflictos de todo el mundo. Puede que ni siquiera impresionantes avances técnicos en el hallazgo, transporte y conservación del agua dulce permitan en el siglo que ahora empieza satisfacer una demanda creciente, sobre todo en el mundo que se abre al desarrollo. Las discrepancias que en unos y otros lugares haya entre las necesidades y el suministro podrían empujar a algunos grupos hacia la violencia, frenar el crecimiento económico y diezmar las poblaciones.

Peter H. Gleick, del Instituto del Pacífico de Estudios sobre el Desarrollo, el Ambiente y la Seguridad, expone la magnitud de los acuciantes problemas que el mundo tiene con el agua, debidos a un uso que crece desbocadamente y a los límites de mal agüero de las reservas conocidas. Sandra Postel, del Proyecto Mundial de Política del Agua, restringe a continuación el análisis al riego, la aplicación que más agua dulce se lleva, y a las perspectivas de que mejore esa técnica agrícola fundamental. Para que nadie crea que es la única manera de tener a raya la escasez tomamos en cuenta también cuatro aproximaciones más: la desalación, el transporte, el reciclado y unas conducciones optimizadas. Hay quienes piensan que nos espera una crisis del agua, pero la evitaremos si no demoramos la respuesta y desarrollamos todas las soluciones de que disponemos. —*La redacción*

La importancia de cada molécula

Con ella satisfacemos la sed, generamos electricidad y regamos los campos. Pero estamos estirando las reservas hasta un punto sin retorno. ¿Habrá agua suficiente para todo y para todos?

Peter H. Gleick

La historia de la civilización humana se entrelaza con la historia del aprovechamiento inteligente de los recursos hídricos. Los primeros grupos que practicaron la agricultura vivían donde las lluvias seguras y los ríos permanentes facilitaban el cultivo. Bastaron unos canales de riego elementales para obtener cosechas mayores y temporadas de cultivo más largas en zonas secas. Hace cinco mil años se construyeron asentamientos en el valle del Indo con conducciones de agua y zanjas de avenamiento para las aguas residuales. Atenas y Pompeya, como la mayoría de las ciudades grecorromanas de la antigüedad clásica, contaban con elaborados sistemas de abastecimiento y desagüe.

A medida que los núcleos de población fueron expandiéndose hubo que traer el agua de fuentes cada vez más lejanas e hicieron falta presas, acueductos y otras depuradas obras de ingeniería. Cuando el Imperio Romano estaba en todo su esplendor, nueve grandes sistemas, con una disposición innovadora de conducciones y albañales perfectamente construidos, aportaban a los habitantes de la Urbe tanta agua por persona como la que se recibe hoy en muchas partes del mundo industrializado.

Durante la revolución industrial y la explosión demográfica de los siglos XIX y XX la demanda creció hasta niveles impresionantes. De la construcción de decenas de miles de monumentales proyectos de ingeniería, pensados para controlar las inundaciones, proteger los depósitos y proporcionar agua para el riego y la energía hidráulica, se beneficiaron cientos de millones de personas. Gracias a la mejora de los sistemas de albañales se han erradicado casi por completo, en las naciones industrializadas, enfermedades endémicas en todo el mundo relacionadas con el agua: el tifus y el cólera.

Traída desde cientos de kilómetros de distancia, desde miles incluso, han florecido ciudades en el desierto. La producción de alimentos ha mantenido el paso del crecimiento explosivo de las poblaciones merced, sobre todo, a la extensión de los sistemas de riego artificial, sin los cuales no sería posible producir el cuarenta por ciento de los alimentos del mundo. Casi un quinto de la electricidad generada en el planeta lo es por las turbinas que giran impulsadas por la energía de los saltos de agua.

Y, sin embargo, este cuadro tiene un lado oscuro. Pese a nuestro progreso, la mitad del mundo sigue sufriendo servicios peores que los de los griegos y romanos. Como reiteraba en noviembre del año pasado el último informe de las Naciones Unidas sobre la disponibilidad del recurso, hay más de mil millones de personas que no cuentan con agua potable limpia y unos dos mil quinientos millones que no tienen saneamientos adecuados. Se cifran en 10-20.000 los niños que mueren cada día por enfermedades ligadas al agua, evitables. Por si fuera poco, los últimos indicios señalan que estamos perdiendo terreno en la resolución de tales problemas. En Iberoamérica, Africa y Asia aparecieron a mediados de los años noventa grandes brotes de cólera. Millones de personas beben en la India y en Bangladesh agua contaminada con arsénico. Y las poblaciones que crecen en un mundo en desarrollo intensifican la presión sobre unas reservas limitadas.

Los efectos de nuestras políticas del agua no sólo ponen en peligro vidas humanas. Decenas de millones de personas han sido obligadas a abandonar sus hogares —a menudo sin que se les avisase con tiempo o se les compensase apenas— para dejar sitio a los pantanos. Más del veinte por ciento de las especies de peces de agua dulce están hoy amenazadas en diverso grado por culpa de las presas y canalizaciones que han destruido los ecosistemas fluviales donde medraban. Ciertas formas de riego degradan la calidad del suelo y reducen la productividad agraria, anuncio de un fin prematuro de la revolución verde. La explotación de los acuíferos subterráneos es más rápida que su relleno natural en algunas partes de la India, China, Estados Unidos y otros lugares. Y las disputas sobre

El Autor

PETER H. GLEICK es el director del Instituto del Pacífico de Estudios sobre el Desarrollo, Ambiente y Seguridad, centro sin ánimo de lucro radicado en la californiana Oakland, que analiza qué políticas podrían seguirse. Gleick fue uno de sus fundadores en 1987.

un recurso compartido han conducido a violencias y sigue generando tensiones locales, nacionales e internacionales.

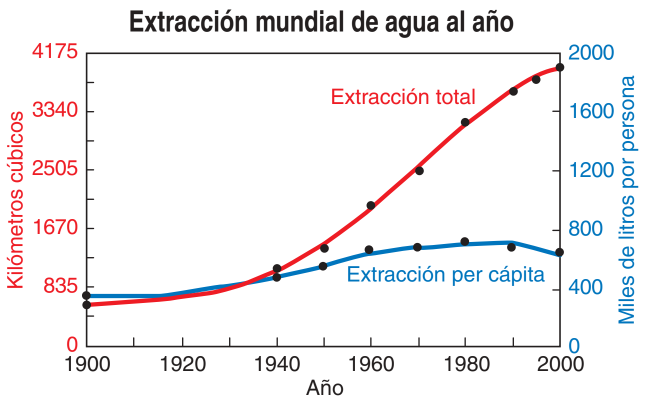
Pero en este principio del nuevo milenio los planificadores van adoptando otra forma de ver el agua. El centro de la atención vuelve a ser la provisión de las necesidades humanas y ambientales básicas, entendidas como lo primero que ha de satisfacerse, y atenderse de manera que haya "algo para todos, en vez de más para algunos", como dice Kader Asmal, ex ministro de agua y bosques de Sudáfrica. Para conseguir esos objetivos y cumplir las exigencias de unas poblaciones que crecen explosivamente, hay expertos que están pidiendo ahora que se usen las infraestructuras de manera más inteligente, en vez de construir instalaciones nuevas, solución que cada vez parece más la medida última, no la primera. Los problemas que se nos plantean son aprovechar el agua disponible con mayor eficiencia, reconsiderar nuestras prioridades a la hora de emplearla y encontrar reservas alternativas que puedan explotarse.

No todo el mundo ha aceptado este cambio de enfoque, que tropieza con la fuerte oposición de algunas organizaciones interesadas. Pero quizá sea la única forma de enfrentarse con éxito a los acuciantes problemas de proveer a todos de agua potable, apta para el cultivo y exenta de agentes portadores de patologías. La historia enseña que el disponer de agua potable y saneamientos no garantiza la supervivencia de una civilización, pero de lo que no cabe duda es de que las civilizaciones no prosperan sin aquélla o éstos.

¿Dónde estará el agua en 2025?

La cantidad total de agua extraída de ríos, acuíferos subterráneos y otras fuentes se ha multiplicado por nueve desde 1900 (*gráfica*). El uso de agua por persona sólo se ha doblado en ese tiempo, sin embargo, y hasta ha caído un poco en los últimos años. Pese a esta tendencia positiva, algunos expertos temen que las mejoras en el aprovechamiento no seguirán el paso del crecimiento demográfico previsto. La cantidad de agua de que se dispondrá al año por persona, según se calcula, en 2025 (*mapa*) indica que al menos el 40 % de los 7200-8000 millones de personas que vivirán entonces en el mundo tendrá que encarar graves problemas que afectarán a la agricultura, la industria o la salud humana en caso de que tenga que habérselas sólo con las reservas naturales de agua dulce. Países ricos en ese recurso —Estados Unidos y China, por ejemplo— podrían sufrir graves restricciones.

Que las personas dispongan de agua depende de factores no reflejados aquí, como las condiciones políticas y económicas, las variaciones del clima y las técnicas con que se cuente.—*P.H.G.*



Zonas propensas a escaseces graves de agua

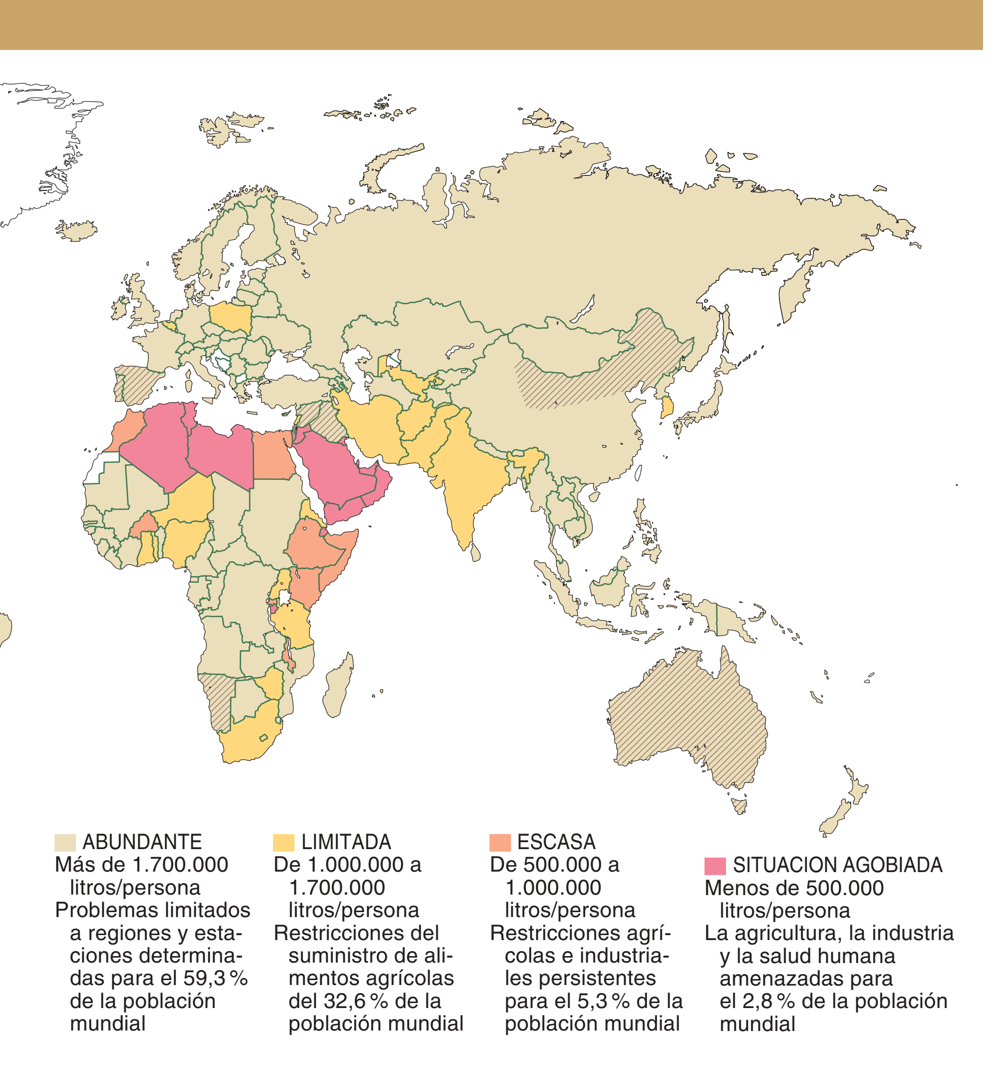
captar y embalsar la mitad del caudal de los ríos del país entero.

Las presas

A lo largo de los últimos cien años la humanidad ha diseñado redes tan extensas de canales, presas y embalses que la resultante redistribución del agua potable de un lugar a otro y entre estaciones modifica un poco el bamboleo que hace la Tierra mientras gira alrededor de su eje. Las estadísticas marean. Antes de 1900 sólo había construidos 40 embalses con más de cien mil millones de litros de capacidad; hoy, casi tres mil mayores que eso inundan cincuenta millones de hectáreas y contienen más de 6000 kilómetros cúbicos de agua (el volumen recogido en los lagos Michigan y Ontario juntos). Las más de 70.000 presas de los Estados Unidos pueden captar y embalsar la mitad del caudal de los ríos del país entero.

Muchas naciones consideraron en un principio que las grandes presas y embalses eran vitales para su seguridad, prosperidad y supervivencia agrícola. Pocos tomaron en cuenta, hasta finales de los años setenta y principios de los ochenta, las consecuencias ecológicas de esos proyectos faraónicos. Hoy, en cambio, los resultados están claros: las presas han destruido los ecosistemas de incontables ríos, arroyos y lagos. El 95 % de los salmones juveniles que intentan llegar al océano en los ríos Columbia y Snake, en el noroeste de Estados Unidos, no sobreviven a la travesía del rosario de presas y embalses que se interponen en su camino. Más de 900 presas de Nueva Inglaterra y Europa impiden que los salmones atlánticos alcancen los lugares de puesta y sus poblaciones se han quedado en menos de un 1 % de lo que fueron. Quizá nada haya impresionado tan negativamente como que el lago Aral, en el centro de Asia, esté desapareciendo, desviada para regar campos de algodón el agua de los ríos Amu Darya y Syr Darya que antes lo alimentaba. Se cree que se han extinguido veinticuatro especies endémicas de peces.

A medida que se ha intensificado la conciencia por las repercusiones sobre el medio, ha crecido el deseo de proteger —de restaurar incluso— algunos de esos recursos naturales. Los primeros grupos ecologistas estadounidenses se movilizaron contra presas que se proyectaba construir en el Parque Nacional de Yosemite (California) o el Gran Cañón (Arizona). Los planes que hubo en la antigua Unión Soviética en los años setenta de desviar ríos siberianos para que no desembocasen en el Artico generaron una indignación pública sin precedentes y los proyectos se suspendieron. La oposición de organizaciones sociales contra los grandes proyec-



tos hidráulicos va adquiriendo una eficacia creciente. Campesinos y representantes de comunidades han encendido en la India un debate público acerca de las grandes presas. En China, donde la discrepancia explícita con las medidas gubernamentales está muy mal vista, las protestas contra el monumental Proyecto de las Tres Gargantas han sido singularmente sonoras y persistentes.

Hasta hace muy poco, el Banco Mundial, los bancos de exportación e importación, las agencias de ayuda multilateral y otras entidades financieras subvencionaban en parte o en su totalidad los pantanos y otras obras de ingeniería civil, cuyo coste a menudo era de billones de pesetas. Esos organismos van poco a poco reduciendo o eliminando tales contribuciones, por lo que la financiación pasa al tesoro de unas economías nacionales de por sí mermadas. Muchos gobiernos, escarmentados ante tanta obra ineficaz en el pasado, y tras haber tenido además que pechar con los costes anejos, monetarios o de otro tipo, no están dispuestos a pagar estructuras nuevas para resolver escaseces de agua u otros problemas.

Un puñado de países avanzan incluso en la dirección opuesta, la de eliminar presas más conspicuas y nocivas. Se demolieron, por ejemplo, las de Maisons-Rouges y Saint-Etienne-du-Vigan, en la cuenca del Loira, para restaurar las pesquerías de la región. La presa Edwards, construida en 1837 en el río Kennebec (Maine), se desmanteló en 1999 para abrir en el río una franja de cerca de treinta kilómetros donde desovasen los peces; en unos meses salmones atlánticos, sábalos americanos, arenques de río, róbalos listados, esturiones de morro corto, esturiones atlánticos, eperlanos arco iris y anguilas americanas habían vuelto a las zonas altas del río. En los últimos años, se han retirado de los cursos fluviales estadounidenses unas quinientas presas viejas, peligrosas o perjudiciales para el entorno.

Por suerte la demanda de agua no crece con la celeridad que se había previsto. Con ello la presión para construir infraestructuras hidráulicas nuevas ha decaído a lo largo de los últimos veinte años. Aunque la población, la producción industrial y la productividad económica no han dejado de aumentar en las naciones desarrolladas, ha disminuido la velocidad a la que se ha ido extrayendo agua de los acuíferos, ríos y lagos. Y en unos cuantos lugares del mundo, la demanda ha bajado incluso.

¿Hasta cuándo?

¿Cuál es la explicación de este notable giro de los acontecimientos? Dos factores cuentan: se han encontrado formas de consumir el agua con más eficacia y los grupos humanos están reconsiderando las prioridades en la utilización de la misma. A lo largo de los tres primeros cuartos del siglo XX la cantidad de agua dulce consumida por persona, en promedio, se duplicó; las extracciones se decuplicaron en Estados Unidos, mientras la población se cuadriplicaba. Desde 1980, en cambio, la cantidad consumida por persona ha disminuido gracias a una serie de técnicas nuevas que ayudan a conservar agua en casas e industrias. En 1965, por ejemplo, Japón usaba unos cincuenta millones de litros por millón de dólares de producción económica; en 1989 esa cantidad (deducida incluso la inflación) era de sólo unos trece millones: la productividad del agua se había multiplicado por cuatro casi.

Mientras la población del mundo siga creciendo no se podrá dejar de construir presas, acueductos y demás infraestructuras, sobre todo en los países en desarrollo cuyas necesidades humanas básicas no están cubiertas. Pero esos proyectos deberán cumplir criterios más rigurosos y explicar a la población en qué medida repercuten en ella y en la naturaleza. Y habrá que ver cómo se satisface la demanda con menos medios y perturbando lo menos posible el entorno incluso allí donde parezca indicado abordar nuevos proyectos.

La solución más rápida y barata es extender el uso productivo y eficaz del agua. En muchos países el 30 % o más del suministro doméstico se pierde antes de llegar a su destino por culpa de las fugas de las

tuberías, los equipos defectuosos o los sistemas de distribución con un mantenimiento deficiente. Con la cantidad de agua que pierde el sistema de suministro de la ciudad de México se cubrirían las necesidades de una ciudad del tamaño de Roma, según cálculos recientes. Hasta con sistemas más modernos es normal que se pierda de un 10 % a un 20 %.

Cuando el agua llega a los consumidores, éstos suelen derrocharla. En las casas, la mayor parte se tira al retrete, al pie de la letra. Las cisternas de casi todos los inodoros vertían en los Estados Unidos veintitantos litros de agua cada vez que se tiraba de la cadena. El Congreso aprobaba en 1992 una norma para toda la nación que implantaba los nuevos modelos de descarga reducida: sólo seis litros, una mejora del setenta por ciento gracias a un mero cambio técnico. Llevará tiempo sustituir todos los retretes viejos con los nuevos, mejorados. No obstante, hay unas cuantas ciudades que han visto que el ahorro que se consigue con la nueva técnica es tan grande —y el coste tan pequeño— que han establecido programas para acelerar la transición a los nuevos prototipos de descarga reducida.

Los propios países en vías de desarrollo deben incorporar las mejoras técnicas, como la aludida de las cisternas economizadoras. Ante la dificultad de hallar nuevos manantiales para la ciudad de México, sus responsables municipales pusieron en marcha un programa de conservación del agua que sustituiría 350.000 cisternas viejas. Con tal reemplazamiento se ha ahorrado ya agua suficiente para abastecer a 250.000 vecinos más. Y todas, naciones industriales y en desarrollo, cuentan con muchas otras opciones: una detección de fugas mejor, unas lavadoras que desperdicien menos agua, el riego gota a gota y plantar parques y jardines con especies que retengan el agua.

La cantidad necesaria para las aplicaciones industriales depende de la combinación de bienes y servicios demandada por la sociedad y de los procesos con que se los genere. Para producir una tonelada de acero, por ejemplo, se consumían, antes de la segunda guerra mundial, de 60 a 100 toneladas de agua. Con las técnicas actuales se consigue con menos de seis. La sustitución de la técnica vieja por la nueva divide por diez el agua que se necesita. Para producir una tonelada de aluminio se requiere sólo una tonelada y media de agua: al sustituir el acero con aluminio, como vienen haciendo los fabricantes de coches desde hace años, se reduce aún más el consumo. Y el teletrabajo ahorraría los cientos de litros que hacen falta para producir, distribuir y vender uno de gasolina, aun teniendo en cuenta los que se lleva la fabricación de los ordenadores.

La agricultura es la actividad que más agua consume. Se pierde ya al encauzarla hacia los campos, y se derrocha la mitad. Bastaría con modestas mejoras en la eficacia agrícola para que quedasen libres cantidades inmensas de agua. El cultivo de una plantación de tomates con los sistemas de riego tradicionales supone gastar un 40 % más que si se implantara el método gota a gota. Incluso la dieta altera las exigencias mundiales. Cultivar un kilo de maíz requiere entre 800 y 2000 litros de agua, según la naturaleza del clima y del suelo y los métodos de riego, pero cultivar el grano necesario para producir un kilo de vaca se lleva entre 16.000 y 70.000 litros. Podemos conservar el agua no sólo modificando las técnicas de cultivo, sino también lo que comemos.

Que el agua se utilice en un sitio u otro puede, asimismo, mejorar mu-

Incesantes conflictos por el agua potable

Mitos, leyendas y libros de historia nos hablan de un rosario de conflictos provocados por las fuentes de agua. En los rollos mesopotámicos leemos ya que los estados de Umma y Lagash de Oriente Medio guerrearon por el control de los canales de riego hará unos 4500 años.

A lo largo de la historia el agua ha sido un objetivo militar y político, la mecha que encendió una guerra. Con frecuencia mayor, sin embargo, las discrepancias se debieron a las arbitrarias fronteras políticas, que no dividían con nitidez los recursos hídricos. Hoy, casi la mitad de las tierras del mundo caen dentro de cuencas fluviales internacionales, y las de 261 grandes ríos están compartidas por dos o más países. Las reclamaciones simultáneas del derecho sobre su aprovechamiento han provocado a menudo disputas, y en años recientes ha habido enfrentamientos locales y regionales sobre asignaciones poco equitativas del agua y su uso que acabaron por enconarse.

Una pequeña muestra de los conflictos sobre el agua sucedidos en el siglo XX demuestra que los tratados y otras expresiones diplomáticas internacionales pueden a veces animar a países contrarios a cooperar, pero no siempre antes de que se vertiese sangre. No puede ignorarse el peligro de futuros enfrentamientos: las disputas sobre el agua serán más comunes en los decenios venideros porque se competirá con mayor intensidad por hacerse con recurso tan preciado y escaso. —*P.H.G.*



LA LINEA DE SUMINISTRO DE AGUA de Novi Sad, Yugoslavia, fue destruida, junto con este puente sobre el Danubio, por un ataque aéreo de la OTAN en abril de 1999.

Estados Unidos 1924
Los campesinos dinamitan varias veces el acueducto de Los Angeles para impedir que se desvíe agua de Owens Valley a Los Angeles.

India y Pakistán 1947-1960
La partición de la India británica divide de forma inadecuada las aguas del valle del Indo entre India y Pakistán. La rivalidad por los suministros para el riego desencadena numerosos conflictos entre las dos naciones; en una ocasión la India cortó caudal que llegaba a los canales de riego paquistaníes. Tras doce años de negociaciones, dirigidas por el Banco Mundial, un tratado de 1960 acabó con las discordias.

Egipto y Sudán 1958
Egipto manda tropas a un territorio por el que disputan las dos naciones durante unas delicadas negociaciones sobre la política de la región y las aguas del Nilo. La firma de un tratado sobre las aguas del Nilo en 1959 alivia las tensiones.

Israel, Jordania y Siria Decenios de 1960 y 1970
Choques por el reparto, control y desvío de los ríos Yarmouk y Jordán que se repiten hasta el día de hoy.

Sudáfrica 1990
Un ayuntamiento partidario del *apartheid* deja sin agua a medio millón de vecinos negros de Wesselton Township tras unas protestas contra las penosas condiciones sanitarias y de vida.

Irak 1991
Durante la guerra de golfo Pérsico, Irak destruye las desalinizadoras de Kuwait. Una coalición de las Naciones Unidas piensa en aprovechar la presa turca de Ataturk para dejar sin caudal el Eufrates en Irak.

India Desde 1991 hasta ahora
Se calcula que han muerto 50 personas por la violencia que sigue estallando entre los estados indios de Karnataka y Tamil Nadu por el reparto del agua para regar del río Cauvery, que pasa de un estado al otro.

Yugoslavia 1999
La OTAN corta el suministro de agua de Belgrado, bombardea los puentes de Danubio e impide la navegación.

chísimo el rendimiento. Para mantener cien mil puestos de trabajo en el sector de las técnicas avanzadas en California hacen falta unos mil millones de litros de agua al año. La misma cantidad de agua utilizada en el sector agrícola mantiene menos de diez; es una diferencia abrumadora. Cifras parecidas valen para muchos otros países. Al final, estas disparidades harán que se presione cada vez más para que se transfiera el agua de los usos agrícolas a otros sectores económicos. A no ser que los agricultores se esfuercen en conservar el agua, sus conflictos con los que la utilizan en las ciudades empeorarán.

Que un planeta cuya superficie está cubierta en su mayor parte por agua tenga que enfrentarse a restricciones parece paradójico, si no fuera porque el 97 % es demasiado salada para el hombre o para los sembrados, y buena parte de la que no lo es se halla lejos de nuestro alcance, en las profundidades subterráneas o en los glaciares y casquetes polares. Resulta lógico que se investigue la explotación de la inmensa reserva oceánica. La desalinización del agua, sea muy salobre o poco, es una técnica todavía muy costosa y sólo puede aplicarse en zonas costeras ricas. Ciertas regiones, del golfo Arábigo sobre todo, dependen de la desalinización, pero ésta sigue contribuyendo muy poco al suministro global de agua, menos de un 0,2 % de las extracciones mundiales.

Dados los elevados costes de la conversión del agua salada en dulce, algunas empresas se han inclinado por transportar agua limpia en barcos o incluso en bolsas de plástico gigantescas, desde el manantial hasta el país consumidor. Pero este método se halla también sujeto a poderosas limitaciones económicas y políticas.

En vez de buscar nuevas y remotas fuentes, los responsables están ya pensando en el uso de otros *tipos* de agua para colmar ciertas necesidades. ¿Por qué tiene que ser potable todo el volumen asignado a una localidad, si luego se malgasta en cisternas de inodoro y en regar el césped? Casi toda el agua acaba yéndose por el desagüe tras un solo uso, y los países desarrollados dedican miles de millones de dólares a recoger y depurar esas aguas residuales antes de verterlas en un río o en el mar. Mientras, en países más pobres, lo normal es que esa agua llegue sin más, sin tratarla, a un río o a un lago, donde quizás amenace la salud de las personas o el entorno. Con acierto se ha empezado a prestar atención a la recuperación y reutilización de esas aguas.

Hay varios niveles de tratamiento de las aguas residuales que la hacen apta para usos diversos, como recargar los acuíferos subterráneos, abastecer a procesos industriales, regar determinados cultivos e incluso aumentar el suministro potable. En la ciudad de Windhoek, en Namibia, los vecinos vienen complementando desde 1968 el suministro potable con aguas residuales tratadas; en años de sequía, esa procedencia ha supuesto hasta el 30 % del agua potable de la ciudad. El 70 % de las aguas residuales municipales de Israel se tratan y vuelven a aprovecharse, sobre todo en el riego de cultivos no alimenticios. Se está intentando captar, tratar y reutilizar más aguas residuales en la vecina Jordania. Los habitantes de California dependían, a mediados de los años noventa, de más de seiscientos mil millones anuales de agua recuperada para regar parques y jardines, campos de golf y cultivos, recargar los acuíferos subterráneos, proveer a procesos industriales y reponer las cisternas de los inodoros.

No será fácil implantar nuevos procedimientos que satisfagan las necesidades de agua. Las estructuras económicas e institucionales siguen alentando el derroche y la destrucción de los ecosistemas. Entre los obstáculos con que tropieza una mejor planificación y uso del agua están los precios demasiado bajos, la información inadecuada sobre la eficiencia de las técnicas nuevas, los repartos poco equitativos y los subsidios de los gobiernos a cultivos que la malgastan o a la construcción de presas.

Parte de la dificultad, no obstante, estriba en que imperen todavía las viejas ideas entre los administradores públicos. Para abordar los problemas básicos que el mundo tiene con el agua, nuestros planteamientos deben cambiar de forma radical. Cambios así se producen despacio. En vez de buscar agua suficiente para colmar vagas previsiones de futuro, importa dar con la manera de satisfacer nuestras necesidades de hoy y de mañana con el agua de que ya disponemos, preservando a la vez los ciclos ecológicos, inseparables del bienestar humano.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE WORLD'S WATER 1998-1999. Peter H. Gleick. Island Press, 1998.

INTERNATIONAL RIVER BASIS OF THE WORLD. Aaron T. Wolf et al. en *Water Resources Development*, vol. 15, núm. 4, págs. 387-427, diciembre de 1999.

THE WORLD'S WATER 2000-2001. Peter H. Gleick. Island Press, 2000.

VISION 21: A SHARED VISION FOR HYGIENE, SANITATION AND WATER SUPPLY. Water Supply and Sanitation Collaborative Council.

Aprovechamiento agrícola del agua

Hace seis mil años, los campesinos de Mesopotamia cavaron una zanja para derivar agua del río Eufrates. Con esa idea afortunada de calmar la sed de sus campos pusieron los fundamentos de la primera civilización basada en el riego. Todos conocen esa página de la historia de los sumerios. Menos difundido está que Sumeria fue una de las primeras civilizaciones en venirse abajo por culpa, en parte, de las consecuencias del riego.

Los campesinos sumerios cosecharon trigo y cebada en abundancia durante unos dos mil años gracias al agua extra que desviaban del río. Pero el suelo acabó por sucumbir a la salinización, la acumulación tóxica de sales y otras impurezas que deja el agua al evaporarse. Incapaz de mantener una producción de alimentos suficiente, muchos historiadores atribuyen a ese suelo arruinado una de las causas principales de la decadencia de la sociedad sumeria.

Son hoy muchos más, sin comparación, los que dependen del riego para sobrevivir. Alrededor del 40 % de la alimentación mundial se cosecha de campos de regadío, que abarcan el 18 % del total de las tierras de labor. La agricultura de regadío suele producir dos o tres cosechas al año *y*, además, mayores. Merced, en buena medida, a la difusión del riego se ha triplicado más o menos la producción mundial de cereales desde 1950. Eficientemente aplicado, el riego seguirá desempeñando un papel capital en la alimentación del mundo. Pero, como enseña la historia, al entregarnos a su dependencia, contraemos graves riesgos.

La agricultura de regadío se lleva dos tercios del agua que se consume en el mundo entero; en algunos países en vías de desarrollo se eleva hasta el 90 %. Para satisfacer la demanda agrícola prevista para 2025 —se espera que por entonces la población mundial sea de unos 7200-8000 millones— harían falta 800 kilómetros cúbicos de agua más, unas diez veces el caudal anual del Nilo. Nadie sabe cómo se suministrará tanta agua adicional sin que se resientan las reservas para usos futuros.

La escasez de agua encierra la peor amenaza contra la producción de alimentos del mañana. En estos mismos momentos se está abusando de muchas fuentes de agua dulce —los acuíferos subterráneos y los ríos— más allá de lo que pueden soportar. Hasta el 8 % de los productos del campo que llegan a la mesa proceden de explotaciones que gastan el agua subterránea más deprisa de lo que tardan los acuíferos en reponerse; es tanta el agua que se detrae de los ríos que, durante buena parte del año, ni llegan al mar. Cuando para 2025 el número de habitantes de las ciudades llegue a los cinco mil millones, los agricultores tendrán que competir aún más agresivamente con las ciudades y la industria por un recurso esquilmado.

Pese a estas dificultades, los agrónomos cuentan con que las tierras de regadío produzcan la mayor parte del alimento adicional que se necesitará en el mundo. Una mejor gestión del suelo y del agua, junto con unas pautas de cultivo más creativas, incrementarían el rendimiento de los campos de secano, pero el peso de la carga recaerá sobre los suelos irrigados. Para que la agricultura de riego dé lo que de ella cabe esperar, deberá reorganizarse en torno a dos objetivos básicos: reducir la demanda de agua de las explotaciones agrarias y proporcionar al campesinado pobre formas baratas de riego.

La autora

SANDRA POSTEL dirige el Proyecto de Política Mundial del Agua, con sede en Amherst, y enseña en el Colegio Mount Holyoke.

Para alimentar una población que no deja de crecer, deberán extenderse los regadíos y hacerse más eficientes

Sandra Postel



1. LOS SURCOS QUE INUNDAN LAS TIERRAS DE LABOR son un método de riego tradicional, pero a menudo derrocha el agua porque buena parte se filtra en el subsuelo o se evapora y no llega a las plantas.

Por suerte, hay amplio margen para mejorar el rendimiento agrícola del agua. De entrada, maximizar el aprovechamiento del riego. Todavía hoy la mayoría de los agricultores inundan el campo entero o llenan de agua los surcos, que corre por gravedad. De ese volumen acopiado, las plantas absorben sólo una pequeña fracción; el resto se filtra en acuíferos, va a parar a cursos fluviales o se evapora. En muchos lugares, este proceder no sólo derrocha y contamina el agua, sino que degrada también el suelo porque lo erosiona, anega y saliniza. Hay técnicas más respetuosas con el medio y más eficientes que podrían reducir la demanda agrícola hasta en un cincuenta por ciento.

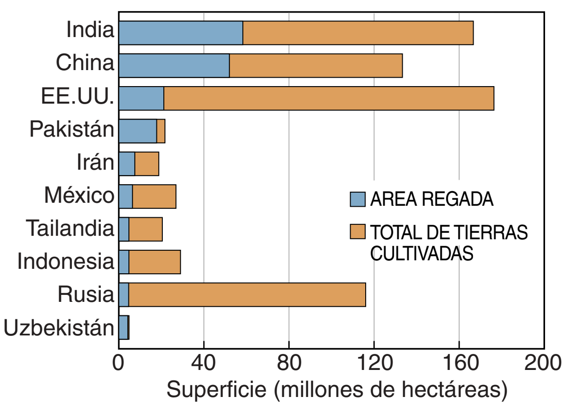
En la lista de las técnicas economizadoras ocupan un lugar preeminente el riego gota a gota. A diferencia del anegamiento, el agua llega a las raíces de las plantas directamente, gota a gota. Apenas se derrocha. El agua corre a baja presión por una red de tuberías perforadas instaladas por encima o por debajo de la superficie del suelo y aflora a través de agujeros, despacio y con regularidad. Instaladas así las plantas en un ambiente húmedo ideal, las cosechas son mayores. Los estudios realizados en India, Israel, Jordania, España y los Estados Unidos han demostrado que el riego por goteo reduce el consumo de agua de un 30 % a un 70 % y aumenta la cosecha, en comparación con los métodos de inundación, de un 20 % a un 90 %.

Los aspersores bien diseñados rinden casi tanto como los sistemas gota a gota. Los aspersores de alta presión disparan la rociada hasta cierta altura para cubrir un área extensa. El problema es que, cuanto más tiempo pase el agua en el aire, más se evaporará y se la llevará el viento antes de llegar a las plantas. Con los nuevos aspersores de baja energía se reparte el agua en dosis pequeñas por medio de unas boquillas situadas a ras de suelo. Allí donde se han instalado estos aparatos se ha visto que las plantas absorben entre un 90 % y un 95 % del agua que sale de las boquillas de los aspersores.

Hay técnicas que podrían reducir la demanda agrícola de agua hasta en un cincuenta por ciento

Pese a estos resultados impresionantes, los aspersores sólo se emplean en un 10 % o 15 % de regadíos, y los sistemas de goteo en sólo un 1 %. El coste de estas técnicas (si lo comparamos con la inundación) ha impedido su difusión, pero también tienen culpa las políticas que, más que incentivar, desaconsejan un uso eficaz del agua. Muchos gobiernos han puesto precios políticos, muy bajos, al consumo de agua en el campo; en consecuencia, los agricultores no ven razón para invertir en métodos ahorradores. Pocas autoridades han regulado el bombeo de las aguas freáticas, ni siquiera allí donde los acuíferos están sobreexplotados. Los agricultores optarían por no derrochar su propio suministro si pudiesen vender los excedentes. Algunos países prohíben esa práctica y muchos políticos no la consideran "progresista".

No sólo se reduce la demanda con modernos dispositivos de riego. Programar los momentos de riego de manera que se ajusten a los requerimientos hídricos de las plantas resulta muy ventajoso. Las mediciones de los factores climáticos, la temperatura y las precipitaciones se cargan en un ordenador que calcula cuánta agua consume una planta corriente; a partir de ahí, el campesino puede determinar, con exactitud, cuándo y cómo debe regar el sembrado a lo largo de su desarrollo. Según un estudio de la Universidad de California en Berkeley en 1995, el consumo de agua de los agricultores californianos que utilizaban ese procedimiento se reducía, de media, en un 13 % y la cosecha aumentaba en un 8 %.



2. CUATRO PAISES TAN SOLO poseen la mitad de los 270 millones de hectáreas de tierras de cultivo irrigadas.

Se aprovecha mejor el agua cuando se usa más de una vez. En muchos sitios se emplea agua reciclada. El 30 % del suministro agrícola en Israel, por ejemplo, se hace con aguas residuales tratadas, y se espera que ese porcentaje aumente hasta el 80 % para 2025. También es prometedor el desarrollo de nuevas variedades de cultivos. Los científicos, en pos de cosechas que rindan más, han explotado ya muchas de las opciones que mejor cumplen el objetivo de producir más alimento con la misma cantidad de agua. Las variedades híbridas de trigo y arroz que apuntalaron la revolución verde se seleccionaron genéticamente de manera que concentrasen más energía de la planta —y por tanto la toma de agua— en los granos comestibles. La adopción generalizada de variedades de arroz de gran rendimiento y maduración rápida ha triplicado, más o menos, la cantidad de arroz cosechada por unidad de agua consumida; es un logro notable. No se vislumbra ninguna estrategia —se haga la mejora con métodos ordinarios o por medio de la ingeniería genética— que pueda repetir semejantes avances a gran escala, pero sí es probable que se den pasos modestos.

No acaban ahí las vías de ahorro. Podemos reconfigurar nuestra dieta. La alimentación norteamericana se caracteriza por un porcentaje alto de ingredientes de origen animal, lo que requiere el doble de agua que las alimentaciones menos ricas en carne comunes en muchos países asiáticos y algunos europeos. Si su fuente alimentaria se hallara en un eslabón inferior de la cadena, dos estadounidenses comerían con el mismo volumen de agua que uno ahora y sin merma de su nutrición total.

La reducción de la demanda hídrica de las explotaciones agrarias tiene una importancia fundamental. Sin embargo, el riego no desarrollará nunca su capacidad de aliviar el hambre y la pobreza rurales si no se hacen más esfuerzos. Entre los ochocientos millones de personas mal nutridas que hay aproximadamente en el mundo se cuentan millones de

familias campesinas pobres a las que beneficiaría muchísimo disponer de agua de riego o de técnicas con las que pudieran sacarle mayor rendimiento a la de su entorno.

La mayor parte de esas gentes viven en Asia y Africa, donde prolongadas estaciones secas dificultan, si no imposibilitan, el cultivo. Para ellas, con sus humildes parcelas de menos de dos hectáreas, las técnicas de riego resultan demasiada caras. La más barata de las bombas motorizadas con que se extraen las aguas freáticas cuesta unos 350 dólares, lejos del alcance de unos campesinos que apenas si ganan esa cifra en un año. Pero donde se ha puesto a su disposición técnicas de riego que podían costear, éstas han conocido un éxito notable.

Viajé a Bangladesh en 1998 para observar uno de tales éxitos. Las lluvias torrenciales anegan Bangladesh en los meses de los monzones, pero las precipitaciones escasean el resto del año. Muchos campos se quedan en barbecho durante la temporada seca, a pesar de que el agua está a menos de seis metros bajo la superficie. A lo largo de los últimos 17 años la “bomba de pedales” ha transformado buena parte de esas tierras en explotaciones que producen todo el año.

Al occidental pudiente esa máquina le recuerda cierto aparato de gimnasia (“un subidor de escaleras”). Se maneja de manera muy parecida. El usuario pedalea sobre dos largas cañas de bambú, los “pedales”, que a su vez activan dos cilindros de acero. La succión atrae el agua subterránea hacia los cilindros y la vierte luego en una acequia abierta en el campo. Las familias pedaleaban de cuatro a seis horas al día para regar sus arrozales y huertos. Pero el trabajo duro rendía sus beneficios: no sólo no pasaban ya hambre en la temporada seca, sino que les sobraban verduras para venderlas en el mercado.

La bomba de pedales, a un precio inferior a 35 dólares, ha permitido que los ingresos netos medios de esos campesinos —que a menudo no pasan del dólar al día— hayan aumentado en unos 100 dólares al año. Hasta la fecha, los agricultores de Bangladesh han comprado 1.200.000 bombas de pedales y la productividad de más de un cuarto de millón de hectáreas ha mejorado. Las bombas, que se fabrican y venden allí mismo, han enriquecido la economía del país en unos 350 millones de dólares anuales.



3. GRACIAS A LAS ECONOMICAS bombas de pedales más de un millón de campesinos de Bangladesh han regado sus tierras por primera vez.

Los campesinos de otras regiones pobres donde escasea el agua están cosechando los beneficios que reportan los sistemas de goteo y aspersión de nuevo cuño. Desde los cinco dólares que vale una regadera de jardín doméstico, son muchos los sistemas de goteo, adaptados a los distintos niveles de ingresos y tamaños de las explotaciones, gracias a los cuales los agricultores que disponen de poca agua riegan ahora sus tierras con eficacia. Hablé en 1998 con campesinos del Bajo Himalaya, en el norte de la India, donde se cultiva en terrazas y riega con un escaso suministro comunal de agua. Esperaban duplicar el área plantada gracias a la eficiencia superior de los sistemas de goteo económicos.

Para que el uso de las técnicas de goteo baratas se difunda hay que crear redes locales de suministro e innovar a la hora de la venta. La bomba de pedales ha triunfado en Bangladesh gracias, en parte, a que han sido negocios locales los que han fabricado y vendido el producto y a que ha habido comerciantes que se han acercado a las familias y han proyectado, por ejemplo, películas al aire libre o presentado exhibiciones en las aldeas. Las dificultades son grandes, pero también lo es el rendimiento posible. Paul Polak, pionero del riego económico, cree que un objetivo realista para los próximos quince años sería reducir el hambre y la pobreza de 150 millones de personas de las poblaciones rurales más desposeídas del mundo mediante la difusión de técnicas asequibles y apropiadas para el riego de pequeñas explotaciones. Si se consiguiese, la renta neta de los campesinos pobres aumentaría, según se calcula, en unos 3000 millones de dólares al año.

A lo largo del próximo cuarto de siglo, el número de personas que vivirán en países con agua escasa saltará de quinientos millones a tres mil millones. Con la incorporación de las nuevas técnicas el campo podrá abastecer a una población creciente, salvaguardando ríos, lagos y acuíferos. Pero habrá que acometer también cambios sociales más radicales, como un crecimiento más lento de la población y un consumo más reducido. La historia, desde Sumeria, advierte del peligro de la complacencia en lo que se refiere a nuestros fundamentos agrícolas. Con todas las amenazas que se ciernen sobre el sostenimiento y productividad de la base del riego moderno, merece la pena aprender la lección.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SALT AND SILT IN ANCIENT MESOPOTAMIAN AGRICULTURE. Thorkild Jacobsen y Robert M. Adams en *Science*, vol. 128, págs. 1251-1258, 21 de noviembre de 1958.

PILLAR OF SAND: CAN THE IRRIGATION MIRACLE LAST? Sandra Postel. W. W. Norton, 1999.

GROUNDWATER IN RURAL DEVELOPMENT. Stephen Foster et al. Technical Paper núm. 463. World Bank, Washington, D. C., 2000.

PRIMER PROCEDIMIENTO:
BUSCAR NUEVAS FUENTES

Desalinización

Extraer agua dulce a partir del agua salada de los océanos es un viejo procedimiento que ha cobrado renovado interés con el avance técnico

Por paradójico que resulte, nuestro planeta "azul" se enfrenta a una crisis de agua. El 97 por ciento de la misma es demasiado salada para apagar la sed del hombre o para regar los cultivos. Hacer frente a la escasez recurriendo a la desalinización (obtener agua dulce, potable, a partir del agua salada del mar) es habitual en las desérticas naciones del Oriente Medio, del Caribe y del Mediterráneo. Pero a medida que el precio de la desalinización desciende y que la demanda de agua sube, los países de la zona templada vuelven su mirada hacia el mar.

Incluso en los Estados Unidos, uno de los países del mundo donde el agua es más abundante, existen plantas de desalinización a gran escala. En el marco de un ambicioso plan para reducir el bombeo de los ya mermados acuíferos subterráneos, el servicio de suministro de agua de Tampa Bay (Florida) ha contratado la construcción de una planta desalinizadora capaz de producir unos 100 millones de litros diarios. Cuentan con la desalinización para suplir las futuras demandas de agua de la región. Houston también pondera la desalinización del agua extraída del golfo de México para contrarrestar la sequía.

El hombre ha obtenido agua dulce de los mares durante siglos, con técnicas centradas en la evaporación para deshacerse de la sal y otros constituyentes indeseados. El agua salada de origen se calienta para acelerar la evaporación, y el agua evaporada se recoge y se destila.

Este proceso, que da buenos resultados, requiere grandes cantidades de energía calorífica, a un precio prohibitivo para casi el todo el mundo, salvo para las poderosas Kuwait y Arabia Saudí. (Un caso aparte es la isla de Curaçao, en las Antillas Holandesas, cuyo suministro municipal de agua proviene, ininterrumpidamente desde 1928, de la desalinización.) Para abaratar el proceso, los planes de destilación modernos reciclan el calor de la etapa de evaporación. La desalinización representa hoy sólo el 0,2 por ciento del agua obtenida de fuentes naturales.

En la técnica de desalinización por membrana, más económica, podría hallarse la solución. La desalinización por membrana se basa en la ósmosis inversa, un proceso en el cual una fina membrana semipermeable se coloca entre un depósito de agua salada y otro de agua dulce. El agua del recipiente salado se somete a una presión mayor, a fin de forzar las moléculas de agua, pero no las de sal ni otras impurezas, hacia el depósito de agua dulce. En esencia, se extrae agua dulce del agua salada.

La investigación sobre la desalinización durante los últimos años se ha centrado en la ósmosis inversa, porque los filtros y demás componentes son mucho menores que las cámaras de evaporación utilizadas en las plantas de destilación. Las plantas de ósmosis inversa son también más compactas y eficientes en el consumo de energía.

Aunque las plantas de ósmosis inversa pueden ofrecer un ahorro de energía, las primeras membranas, fabricadas ya de fibras de poliamida, ya de láminas de acetato de celulosa, eran frágiles y no duraban más allá de tres años. Estos materiales son muy sensibles a los contaminantes del agua original, particularmente al cloro, que endurece las membranas, y a los microorganismos, que la atascan. Los regímenes de tratamiento previo, como el filtrado de sedimentos y de bacterias, deben extremar su rigor. Se es-



pera eliminar los problemas con una nueva generación de las membranas finas de materiales compuestos, fabricadas de películas de poliamida. Aunque harto sensibles todavía a la contaminación, las nuevas membranas son muy robustas, proporcionan una mejor filtración y su duración se puede alargar hasta los 10 años.

Las prestaciones técnicas, pese a su importancia, no bastan para mover a la adopción de la desalinización como fuente de agua dulce. Con o sin adelantos técnicos, el mercado de los equipos de desalinización muy probablemente crecerá a buen ritmo en los 10 próximos años, a medida que los municipios se den cuenta del potencial y de las ventajas económicas de los equipos disponibles.

Cientos de proveedores están vendiendo ya muchos millares de unidades de desalinización al año, cuya capacidad varía desde las que proporcionan unos litros (pequeñas unidades de emergencia para los botes salvavidas) hasta decenas de millones de litros diarios (sistemas municipales).

Hoy día las mejores estimaciones apuntan que unas 12.500 plantas desalinizadoras proporcionan un 1 por ciento aproximadamente del agua potable del mundo. Sin duda, esto es sólo el comienzo. En el futuro, el agua del vaso puede tener su origen en el mar.

—Diane Martindale



Transportar agua en enormes bolsas podría ser una solución más

Transporte por remolcadores

Las tuberías permiten transportar el agua a gran distancia por tierra a un precio barato. Ojalá se pudiera hacer lo mismo en los mares. Arrastrar contenedores herméticos de plástico o de tejido con remolcadores puede ser una solución.

La compañía inglesa Aquarius Water Trading and Transportation Ltd. comenzó en 1997 a remolcar agua desde la Grecia peninsular hasta las islas del litoral en enormes bolsas de poliuretano, prestando ayuda a las localidades con gran afluencia turística para hacer frente a la mayor demanda de agua potable durante la temporada alta. Otra compañía, Nordic Water Supply, de Oslo, ha realizado aprovisionamientos similares desde Turquía hasta el norte de Chipre utilizando sus propios contenedores de tejido.



EL INVENTOR de bolsas de agua Terry G. Spragg posa sobre uno de sus contenedores gigantes de plástico, remolcado por el estrecho de Puget en el curso de una de sus exhibiciones en 1996.

Esta idea de las bolsas de agua surgió a principios de los años ochenta con la pretensión de acarrear grandes cantidades de agua de manera más barata que con petroleros adaptados. Durante muchos años, petroleros y barcazas han aprovisionado con pequeñas cantidades de agua dulce a regiones que se la podían costear a precio de artículo de lujo, como las Bahamas, Chipre y otras islas con recursos inadecuados. También se transportó agua con buques cisterna durante sequías de corta duración y en la eventualidad de algunos desastres; por ejemplo, tras el terremoto de Kobe en 1995.

Aquarius ha fabricado ocho bolsas de 790 toneladas y dos modelos de 2200 toneladas; estas últimas pueden recibir un par de millones de litros de agua cada una. Aquarius también ha desarrollado modelos 10 veces mayores que los que se utilizan actualmente, y el año pasado Nordic comenzó a fabricar bolsas que admiten casi 30 millones de litros.

Las bolsas de agua podrían ofrecer una alternativa menos onerosa a los buques cisterna (las bolsas de la flota de Aquarius tienen precios que van de los 125.000 dólares a los 275.000), pero quedan por resolver algunos problemas técnicos. En particular, resulta muy delicado fabricar bolsas capaces de soportar las tensiones de una travesía por mar abierto. Para los suministros de las islas griegas y Chipre, las bolsas sólo tenían que remolcarse unas 60 millas. Los sistemas de tuberías necesarios para conectar las bolsas al suministro de agua en tierra firme pueden construirse a partir de la técnica existente, pero en algunas ocasiones las bolsas se han desgarrado durante el transporte.

Un tercer inventor de bolsas de agua, Terry G. Spragg, de Manhattan Beach (California), intenta resolver los problemas de volumen y remolcado de una manera diferente. Con el apoyo de científicos e ingenieros, Spragg ha patentado cremalleras especializadas, con dientes de varios centímetros de largo, que pueden enlazar bolsas de agua a modo de vagonetas. Ya ha demostrado que la técnica es factible, pero aún no ha vendido ninguna.

Hasta el momento, esta técnica se ha empleado sólo para el suministro de agua dulce en situaciones de emergencia y para aprovisionar regiones costeras con penuria de agua donde una acuciante demanda a precios elevados esté asegurada. Para algunas comunidades que no dispongan de otra opción, las bolsas de agua pueden ofrecer una solución nueva y diferente.

—Peter H. Gleick

PROCEDIMIENTO 3:
REDUCIR LA DEMANDA

Fugas y filtraciones

Aunque por Nueva York fluyen cada día más de tres mil millones de litros de agua, apenas se desperdicia

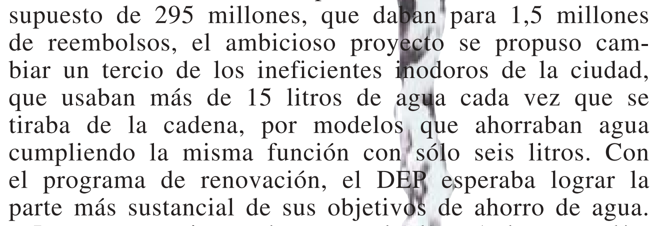
Nueva York es la ciudad de los excesos, excepto si se trata del agua. Nadie lo sospecharía, pero la Gran Manzana ha estrechado el cerco en torno a los derroches de agua, y tras 10 años de remendar tuberías que perdían y reemplazar millones de retretes que consumían agua insaciablemente, la ciudad se ahorra ahora miles de millones de litros de agua cada año.

A principios de los noventa, Nueva York se enfrentaba ante la perspectiva de una inminente penuria de agua, y el asunto iba a peor con cada ducha, cada cepillado de dientes o cada vez que se tiraba de la cadena del inodoro. Con la afluencia de nuevos residentes y el aumento de los años de sequía, la ciudad necesitaba obtener unos 350 millones de litros de agua adicionales cada día, como un 7 por ciento del consumo total de agua. En vez de gastarse mil millones de dólares en una nueva estación de bombeo a orillas del río Hudson, la municipalidad optó por una alternativa más barata: reducir la demanda de suministro de agua corriente, que llegaba por tubería desde las Montañas Catskill.

Los funcionarios municipales sabían que persuadir a los neoyorquinos para que abrazaran la ecología y ahorraran agua requeriría cierto incentivo: sanitarios gratis. El Departamento de Medio Ambiente de la ciudad (DEP) presentó un programa de subsidio a la renovación de cuartos de baño en un plazo de tres años, que comenzó en 1994. Con un presupuesto de 295 millones, que daban para 1,5 millones de reembolsos, el ambicioso proyecto se propuso cambiar un tercio de los ineficientes inodoros de la ciudad, que usaban más de 15 litros de agua cada vez que se tiraba de la cadena, por modelos que ahorraban agua cumpliendo la misma función con sólo seis litros. Con el programa de renovación, el DEP esperaba lograr la parte más sustancial de sus objetivos de ahorro de agua.

Los neoyorquinos adoptaron el plan. A los tres días del comienzo, se recibieron unas 20.000 solicitudes. Cuando el programa acabó en 1997, 1.330.000 retretes ineficientes se habían reemplazado por otros de bajo consumo de agua en unos 110.000 edificios. Resultado: una reducción del 29 por ciento de consumo de agua por edificio al año. El DEP estima que los inodoros de bajo consumo ahorran entre 250 y 350 millones de litros al día en la ciudad, lo que bastaría para llenar 6700 piscinas olímpicas.

Pero los inodoros más eficientes no bastaban. Durante gran parte de la historia de la ciudad, el precio que los



PROCEDIMIENTO 4: RECICLAR

Aprovechamiento máximo

En las regiones áridas del mundo, ni siquiera las aguas residuales pueden desperdiciarse

Namibia es el país africano más seco al sur del Sahara. El calor abrasador evapora el agua antes de que la lluvia pueda aliviar la tierra cuarteada. Carece de ríos permanentes que corran todo el año. A los habitantes de la capital, Windhoek, no les basta simplemente conservar el agua para asegurarse un suministro ininterrumpido. Deben reutilizar la poca que tienen.

A finales de los sesenta, la mayoría de los acuíferos y las reservas de los ríos estacionales cercanos a Windhoek habían quedado agotados por la bullente población de la capital, que pasó de 61.000 habitantes a más de 230.000 en los últimos 30 años. Transportar agua desde el río permanente más cercano, el Okavango (a unos 650 kilómetros de distancia), era demasiado caro. La crisis incitó a los funcionarios municipales a poner en marcha un estricto sistema de aprovechamiento del agua que comprende la recuperación

propietarios de las viviendas pagaban por el agua se calculaba en función del tamaño del solar. Pero conforme a una ley aprobada en 1985, la ciudad comenzó a llevar un registro del consumo de agua y a pasar la factura correspondiente. La ley establecía que se instalaran contadores con ocasión de las renovaciones de edificios, y los mismos requerimientos se imponían a la construcción de nuevas residencias y apartamentos desde 1988. En 1998, todos los inmuebles de la ciudad debían disponer de contador.

Los propietarios que deseen reducir la factura del agua pueden pedir —gracias a esta nueva ley— una inspección gratuita para asesorarles sobre la eficiencia del consumo del agua. Los inspectores comprueban si las tuberías pierden, ofrecen consejos sobre la sustitución de instalaciones por otras más eficientes y distribuyen gratis filtros aireadores para grifos y alcachofas de ducha de bajo consumo. Las alcachofas de ducha de bajo consumo utilizan más o menos la mitad de agua que las antiguas, y los filtros aireadores de los grifos, que reemplazan la rejilla en el extremo del grifo e incorporan aire al chorro, pueden reducir el flujo de agua de unos 15 litros por minuto a menos de cuatro litros por minuto. Las inspecciones de este género ahorran unos 40 millones de litros de agua al día gracias a la eliminación de fugas y filtraciones, así como a un aprovechamiento mejor.

En su afán por ahorrar más agua aún, Nueva York ha salido a la calle. La municipalidad ha instalado tapas magnéticas en las bocas de emergencia para los bomberos a fin de evitar que la gente las abra en verano. El municipio también vigila el subsuelo, y utiliza equipos de sonar informatizados para detectar fugas a lo largo de los 9934 kilómetros de sus conductos principales.

Aunque la población de la ciudad continúa aumentando, el consumo de agua por persona en Nueva York descendió de 700 a 600 litros al día entre 1991 y 1999. Según todos los indicios, esta tendencia continúa. *—D.M.*

LA CAPITAL DE NAMIBIA, Windhoek, combate la penuria de agua reciclando las aguas residuales para potabilizarlas.

del agua residual de los hogares y su tratamiento para potabilizarla.

La primera instalación de tratamiento de aguas, que al principio sólo tenía capacidad para producir 1600 millones de litros de agua limpia por año, cuando se puso en marcha en 1968, proporciona ahora el doble de esa cantidad, suficiente para suministrar el 23 por ciento de la demanda anual de la ciudad. La municipalidad espera elevar ese porcentaje de suministro hasta el 51 por ciento con una nueva planta actualmente en construcción.

Para potabilizar el agua de desecho, ésta debe seguir un riguroso régimen de limpieza. Se empieza por dejar sedimentar los sólidos, mientras que unos biofiltros extraen partículas orgánicas. El amoníaco se extrae mediante tratamientos avanzados, y con filtros de carbón y arena se asegura la eliminación de las últimas trazas de material orgánico disuelto. El paso final es purificar el agua añadiendo cloro y cal. Para garantizar un suministro seguro de agua potable, semanalmente se realizan unas pruebas con el agua tratada al objeto de detectar la presencia de bacterias, virus y metales pesados. (Las aguas residuales industriales plagadas de productos químicos tóxicos se desvían a otras plantas de tratamiento.) En comparación con el agua corriente local, la tratada es de igual o mejor calidad.

Pese a que disponen desde hace 32 años de agua reciclada de gran calidad, los habitantes de Windhoek todavía se oponen a su uso para el consumo personal. Por esta razón, la mayor parte del agua residual purificada se emplea para regar parques y jardines. Pero algunas veces la gente no tiene elección en cuanto a las fuentes de agua. En los momentos de mayor demanda estivales o durante algunas sequías, con los depósitos locales esquilmados, Windhoek debe recurrir a las aguas fecales tratadas para asegurar el suministro. Durante la sequía de 1995, por ejemplo, el agua tratada supuso más del 30 por ciento del agua limpia enviada a los hogares.

La municipalidad espera granjearse el apoyo al programa de reciclaje a través de una mejor información al público, dando a conocer, por ejemplo, que, además de irrigar las zonas verdes de la ciudad, el agua residual tratada es el ingrediente secreto de la famosa cerveza local. *—D.M.*

PERFILES

Daniel Grossman

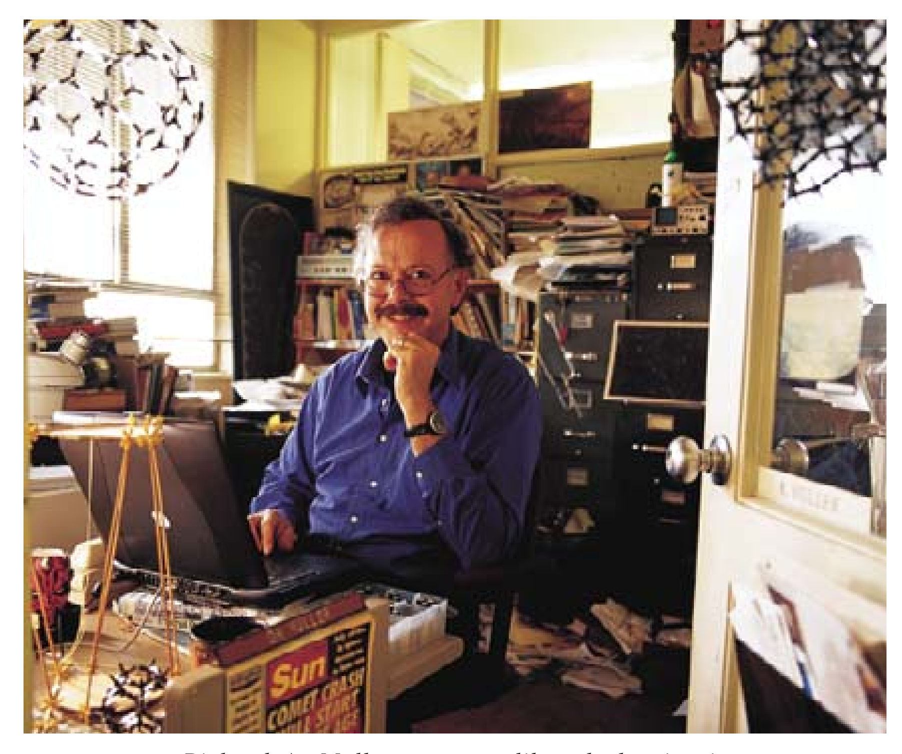
RICHARD A. MULLER: Un desastre tras otro

Berkeley (California).— La primera vez que me reuní con Richard A. Muller fue durante una ola de calor de las que hacen época. El astrofísico había salido a buscar un refresco. Las botellas de batido de moka, su bebida preferida, se pueden obtener en una máquina cercana. A través de la mampara transparente, percibe que algo está fuera de lugar: una botella de zumo atrapada oblicuamente contra el cristal. "O saco dos botellas o ninguna", predice alborozadamente, introduciendo las monedas y seleccionando la bebida que cree que va a desencajonar la otra con mayor probabilidad. Obtiene la bebida seleccionada, pero no llega a derribar la otra.

Lances como éste ilustran lo que es la vida de Richard Muller, aunque con desafíos de otro tono. Incansable, le encanta merodear en busca de nuevo territorio científico que conquistar. "Hay que tener una idea interesante cada día", dice. Su investigación doctoral versaba sobre la física de partículas, pero su producción va desde la invención de una técnica mejorada para la datación por carbono hasta el diseño de un experimento para medir la radiación de fondo cósmica que dejó la explosión primordial hace unos 15.000 millones de años.

Estas y otras realizaciones le valieron la beca MacArthur en 1982, un año después de que comenzaran estos "premios a los genios", como se las conoce. Fue una encrucijada. Tras eso, Muller se sintió libre para trabajar a su aire.

Al menos en lo exterior, encaja en el estereotipo de científico. Se va al laboratorio entrada la noche cuando se le ocurre una idea. Su atestado despacho, con vistas a los prados de la Universidad de California en Berkeley, donde sigue desde que recibiera su doctorado en física de partículas hace ya 32 años, podría servir de escenario para una comedia de profesor chiflado. Casi no queda sitio en el suelo para un visitante entre archivadores, pupitres y carpetas rebosantes de revistas y separatas. Su bandeja de correo gime bajo una pila de medio metro de papel. "Mi investigación ha sido un desastre tras otro", dice con picardía. Esta frase tan manida resulta ser literalmente cierta. Trabajó sobre la explosión primordial. Estudió el violento estallido de supernova que precedió la creación del Sol. Y ahora está su Némesis.



Richard A. Muller: extremo libre de la ciencia

"Némesis" es una hipótesis extraña que concierne la evolución de la vida en la Tierra. Muller la concibió un día de 1983 cuando su director, el premio Nobel Louis Alvarez, le propuso como tarea al joven físico echar por tierra cierto artículo de investigación demostrando que en la Tierra se daban extinciones significativas de plantas y animales a intervalos regulares: cada 26 millones de años. Alvarez y su hijo, Walter, habían propuesto no hacía mucho la teoría de que los dinosaurios habían sido víctimas de un cometa del tamaño del Everest que sacudió el planeta hace 65 millones de años. En aquel momento, la hipótesis fue blanco de las burlas; hoy es comúnmente aceptada. Representando el papel de abogado del diablo frente a Alvarez, Muller compuso el siguiente escenario. Imaginemos, sugería, que el Sol tenga un gemelo alrededor del cual oscila con un período de 26 millones de años. Y supongamos que, a cada revolución, la estrella penetre en la nube de Oort, la zona donde se forman los cometas, que dista de nosotros entre 6 y 16 billones de kilómetros. Quizás algunas de esas bolas de hielo, de las que existen miles de millones, se vieran despedidas de sus términos, abalanzándose sobre la Tierra.

Al principio la idea les parecía ridícula, incluso a Muller. Pero ni a él ni a Alvarez se les ocurrió razón alguna que invalidara la teoría. Por un antojo, Muller llamó Némesis a la estrella, en honor a la diosa griega que protege de la locura humana. "Nos preocupa que si no se encuentra la estrella compañera —afirmaba en el artículo científico en el que se presentaba su teoría— este escrito sea nuestra Némesis."

Parece contrario a la intuición que el sistema solar pueda estar oscilando alrededor de una estrella desconocida; la verdad, sin embargo, es que la mayoría de las estrellas tienen compañeras: aproximadamente un 85 por ciento cuentan con algún tipo de compañera. La única manera de identificar cuál de las estrellas catalogadas —caso de que fuera alguna— es la gemela solar requiere medir las distancias hasta ellas. Muller dice que la órbita elíptica de Némesis la separaría no más de 30 billones de kilómetros de la Tierra, una distancia de tres años luz y a tres cuartos de la distancia a la estrella conocida más cercana, Alfa de Centauro. Podría ser una enana roja, visible con un pequeño telescopio o, menos probablemente, una enana marrón, que podría no ser visible en absoluto.

Cuando se le ocurrió su teoría, casi veinte años atrás, Muller pensó que localizaría Némesis en un par de años. Dada su presunta distancia y su brillo, sería fácil encontrar tal estrella a partir de medidas de paralaje (viendo cómo se desplaza respecto al campo estelar de fondo conforme la Tierra recorre su órbita). Pero la búsqueda, falta de financiación para reservar tiempo de telescopio, languideció y acabó por abandonarse. Se queja de que la mayoría de los astrónomos piense que su teoría quedó refutada, cuando en realidad simplemente descansa en el limbo.

No es casualidad que buena parte de su trayectoria profesional la haya pasado estudiando tales sucesos tumultuosos. Durante siglos, los científicos han proclamado teorías sobre la evolución de la Tierra basadas en los principios de uniformitarismo y gradualismo, que postulan que en general el planeta evolucionó lentamente, en razón de las mismas fuerzas cuya acción se contempla hoy día, como son la erosión y la deriva de los continentes. Muller, sin embargo, atribuye idéntico valor a sucesos violentos e infrecuentes, una doctrina que algunos denominan catastrofismo. Afirma que el desdén por las explicaciones catastróficas le da una oportunidad estratégica: "Ahí es donde están los descubrimientos".

Más recientemente, Muller ha comenzado a indagar en las edades glaciales. Los geólogos se las ven y se las desean para explicar su ir y venir. El insiste en que la respuesta tiene un interés que trasciende a lo académico. Saltando de su sillón, se dirige a la pizarra y traza un gráfico de la temperatura global desde la revolución industrial. En total, la temperatura global ha subido casi un grado en los últimos 120 años, y entre 8 y 11 desde la recesión de los glaciares hace 12.000 años. "Cualquier cosa que pueda producir como resultado esos 8 grados habrá de repercutir en el clima actual", sentencia.

Las eras glaciales llegan y se van a intervalos de 100.000 años. La explicación tradicional, refinada y popularizada por el matemático serbio Milutin Milankovitch en los decenios anteriores a la Segunda Guerra Mundial, entraña sutiles irregularidades en el movimiento de la Tierra. En breve, la teoría postula que la excentricidad de la órbita terrestre, que es la desviación respecto a la circunferencia, provoca una variación de la cantidad de luz solar que baña nuestro planeta.



El hielo invasor, del número de Amazing Stories *aparecido en enero de 1929, despertó un temprano interés de Muller por las eras glaciales*

Esmeradas reconstrucciones de los movimientos que ha sufrido la Tierra revelan que la órbita del planeta en torno al Sol pasa de ser casi perfectamente redonda a ligeramente oval y regresa a la redondez original en 100.000 años, coincidiendo con el intervalo entre las edades glaciales. Pero quedan problemas sin resolverse. Por ejemplo, el modesto cambio en excentricidad orbital no supone sino pequeños cambios en la luz solar que alcanza la Tierra, insuficientes para producir glaciaciones. A mayor abundamiento, algunas edades glaciales parecen haber comenzado antes que las variaciones orbitales que supuestamente las produjeron.

Aunque quienes la sostienen piensan que una investigación más detallada explicará tales conflictos, Muller cree que la tesis de Milankovitch es errónea. Su única respuesta descansa sobre un aspecto diferente de la órbita terrestre. Imaginemos que el sistema solar es un disco de vinilo. La Tierra viaja exactamente sobre ese disco, llamado la eclíptica, sólo una parte del tiempo. En otros momentos, la órbita está inclinada algunos grados respecto al disco. Durante un ciclo de 100.000 años, la órbita terrestre comienza en la eclíptica, asciende por la misma y retorna luego al lugar donde había comenzado. Este lento balanceo, propone Muller, es responsable de las glaciaciones de la Tierra. Dice que las regiones por encima y por debajo de la eclíptica están plagadas de polvo cósmico, que enfría el planeta.

La teoría de la inclinación de Muller cobró nuevos bríos en 1995, cuando Kenneth Farley, un geoquímico del Instituto de Tecnología de California, publicó un artículo sobre el polvo cósmico recogido en los sedimentos marinos. Comenzó su investigación con la expectativa de desbaratar la teoría de Muller, pero descubrió que los niveles de polvo cósmico crecen y menguan en sincronía con las edades glaciales.

Pero la mayoría de los investigadores parecen compartir el sentimiento de Wallace Broecker, un geoquímico de la Universidad de Columbia, que piensa que Muller anda equivocado. En 1996 Broecker reunió a un grupo de expertos climáticos de altos vuelos y los llevó a escuchar la teoría de Muller. Dice que encontraron la presentación "cautivadora", pero que "no quedaron convencidos".

"No hay ningún mecanismo asociado a la idea", afirma Nicholas J. Shackleton, geólogo marino de la Universidad de Cambridge y uno de los principales valedores de la teoría de Milankovitch. Se pregunta cómo puede ser que pequeños cambios en el polvo interplanetario acaben en efectos tan drásticos como las idas y venidas de las edades glaciales. Muller responde que el polvo del espacio influye en la cobertura de nubes de la Tierra y podría tener profundas repercusiones climáticas. Su teoría, si se toma objetivamente, puede explicar los hechos con la misma solvencia que la de Milankovitch. Así al menos lo cree él.

Nanotubos de carbono

Nuevos sensores químicos

Los nanotubos de carbono, descubiertos por Sumio Iijima a principios de los noventa, son cables grafíticos con dimensiones moleculares y propiedades físicas y químicas tan novedosas que prometen interesantes aplicaciones técnicas. Estos cables moleculares tienen longitudes micrométricas y diámetros nanométricos.

Los grupos de Hongjie Dai, de la Universidad de Stanford, y Alex Zettl, de la de California en Berkeley, han mostrado que los nanotubos de carbono podrían constituir óptimos sensores químicos, capaces de detectar diminutas concentraciones de gases tóxicos.

La detección de moléculas gaseosas es crítica en el control ambiental, en el control de procesos químicos, en misiones espaciales y en agricultura y medicina. Sin ir más lejos, la detección del dióxido de nitrógeno (NO_2) desempeña un papel importante en el análisis de la contaminación resultante de la combustión o de las emisiones de automóviles; la detección de amoníaco (NH_3) reviste interés especial en entornos industriales, biológicos y médicos.

Podemos imaginar la formación de un nanotubo de carbono partiendo de una lámina grafítica plana, de un átomo de espesor, alargada en una dirección del plano y estrecha en la otra. Doblando la lámina hasta que los dos bordes largos se unen, se forma un tubo cilíndrico en el que la coordinación atómica sigue siendo igual que en el grafito, aunque los enlaces químicos están sometidos a la tensión de curvatura.

Esos tubos de una sola capa se obtienen mediante diversas técnicas de síntesis. También se crean tubos con paredes formadas por varias capas grafíticas. Además se sintetizan "cuerdas" trenzadas por tubos adheridos lateralmente unos a otros por débiles fuerzas de van der Waals.

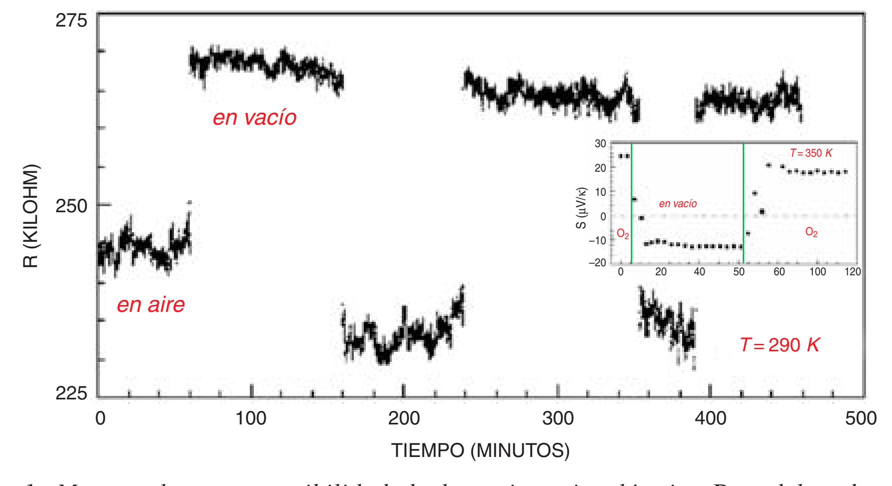
El carácter eléctrico, metálico o semiconductor, de los nanotubos depende de los detalles estructurales, como la forma precisa de cortar y enrollar la hoja grafítica, así como de la presencia de defectos e impurezas. Las medidas experimentales de las propiedades eléctricas (resistividad, poder termoeléctrico y densidad de estados electrónicos) que se habían realizado hasta ahora no prestaban atención suficiente a la posible contaminación de la superficie del tubo por moléculas de gas que se produce durante los procesos de síntesis y purificación de los nanotubos.

Pero los experimentos de los dos grupos californianos muestran que dicha contaminación puede alterar las propiedades eléctricas y de transporte de los nanotubos, por lo que sería conveniente reevaluar críticamente los datos de experimentos anteriores en relación a las aplicaciones en dispositivos electrónicos.

De hecho, la extrema sensibilidad de las propiedades eléctricas a la presencia de moléculas gaseosas absorbidas en el tubo constituye el motivo que ha llevado a estos grupos a proponer el uso de los nanotubos de carbono como novedosos sensores químicos.

La figura 1 muestra la resistencia eléctrica y el poder termoeléctrico de los nanotubos de carbono en diferentes entornos gaseosos, medida a temperatura ambiente. El medio en que se encontraban los nanotubos cambiaba alternativamente entre el aire y el vacío (presión menor de 10^{-6} torr). Se aprecia un cambio rápido y reversible en la resistencia con el medio donde se halla inmersa la muestra de nanotubos. Este cambio se debe a la exposición al oxígeno. Por tanto, los nanotubos saturados con oxígeno presentan una conductancia eléctrica (inverso de la resistencia) mayor que los nanotubos con menos oxígeno absorbido.

El cambio sustancial en la resistencia, así como el cambio drástico del poder termoeléctrico, demuestran que los nanotubos de carbono actúan como sensores de oxígeno sumamente sensibles. La reversibilidad del efecto mostrado en la figura sugiere que el oxígeno está débilmente ligado a los nanotubos, lo que se conoce como fisisorción. A efectos prácticos, importa que la reversibilidad sea alta a temperatura ambiente. A temperatu-



1. Muestra la gran sensibilidad de la resistencia eléctrica R *y del poder termoeléctrico* S *de películas formadas por nanotubos de carbono al medio ambiente gaseoso. Los experimentos, a temperaturas de 290 kelvin y 350 kelvin respectivamente, fueron realizados por Ph. G. Collins, K. Bradley, M. Ishigami y A. Zettl, de la Universidad de California en Berkeley. La resistencia eléctrica de los nanotubos cambia en un 10-15 % a medida que la cámara en la que se aloja la muestra se llena y se vacía de aire alternativamente. Se obtuvieron resultados idénticos en una atmósfera de oxígeno puro, lo que indica que la absorción de este gas es la causa de los cambios de resistencia. De manera análoga, el poder termoeléctrico cambia no sólo de magnitud, sino también de signo al exponer la muestra de nanotubos al oxígeno*

ras más bajas resulta más difícil que se desprenda el oxígeno absorbido.

Para determinar la densidad local de estados electrónicos en distintas posiciones a lo largo de la longitud del nanotubo se recurre al microscopio de efecto túnel. Con él se ha observado que nanotubos inicialmente semiconductores, con una banda de energías prohibidas de unas pocas décimas de electronvolt, se tornan conductores al estar expuestos a una atmósfera de oxígeno, lo que corrobora los resultados de las medidas de resistencia eléctrica.

No se tiene una explicación precisa del aumento de la conductancia inducido por el oxígeno. Según parece, el nanotubo se comporta a la manera de un semiconductor dopado de tipo *p*, es decir, con huecos en la banda de valencia responsables de la conducción. Estos huecos podrían deberse a la captura de electrones por el oxígeno, elemento muy electronegativo, lo que daría lugar a estados de impureza en la banda de energías prohibidas, aunque muy cerca de la banda de valencia, y a los correspondientes huecos móviles en la banda de valencia.

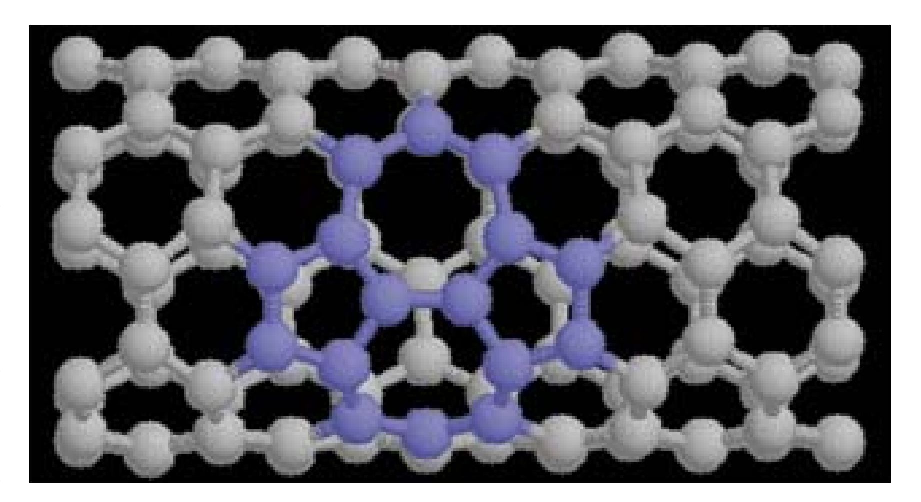
De acuerdo con nuestros cálculos, se daría una apetencia del oxígeno atómico por las zonas del nanotubo con defectos estructurales, que facilitan la transferencia de carga electrónica. Un defecto típico se produce al rotar un ángulo de 90º un enlace entre dos átomos de carbono, lo que da lugar a un defecto formado por dos pentágonos y dos hexágonos (*figura 2*). Los cálculos muestran que los pentágonos engendran un entorno con una alta densidad local de estados electrónicos, lo que proporciona un acomodo ideal para el oxígeno, facilitando las reacciones de transferencia de carga. El mismo entorno preferente ocurre con los pentágonos que se dan en los extremos cerrados de los nanotubos. Esto, por otra parte, hace de la sensibilidad al oxígeno un método prometedor para determinar la concentración de defectos estructurales en los nanotubos.

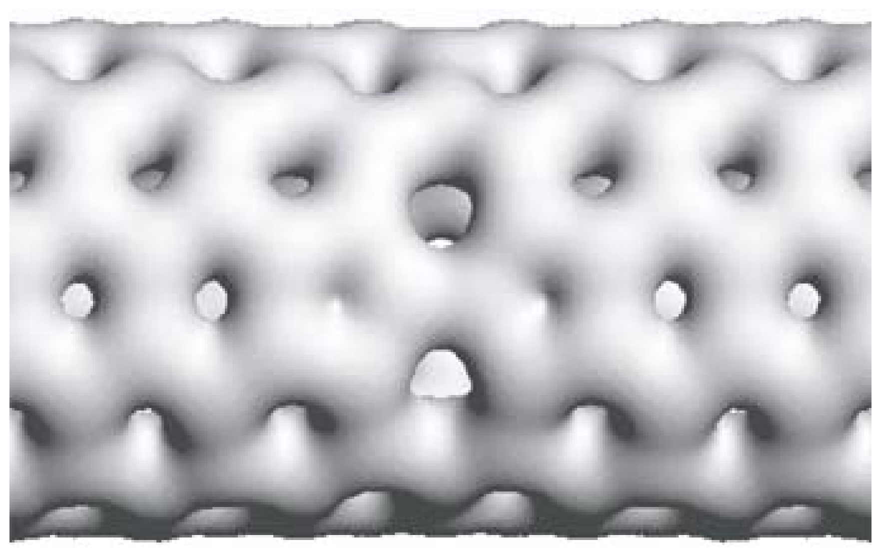
Nuestros cálculos sugieren también la relevancia de los defectos estructurales en la mejora de la eficiencia de la reacción de reducción electroquímica del oxígeno en electrodos formados por nanotubos, lo que ofrece aplicaciones potenciales en baterías de carbono de alta capacidad.

Dai y sus colaboradores midieron el cambio en la resistencia eléctrica de los nanotubos inducida por su exposición a NO_2 y NH_3, con un resultado más espectacular incluso: la resistencia de nanotubos semiconductores cambia hasta tres órdenes de magnitud en sólo varios segundos de exposición a la temperatura ambiente. La resistencia disminuye en el caso del NO_2 y aumenta para el NH_3.

Antes de la exposición a estos gases, los nanotubos usados por Dai se comportaban como un semiconductor dopado de tipo *p*. Aunque las razones precisas no se conocen, bien pudiera ser una de ellas la contaminación por oxígeno u otras especies, como antes se indicó. Cuando se absorbe NO_2 en la superficie del nanotubo se espera que éste transfiera algo de carga electrónica a la molécula, lo que supone un aumento del número de huecos en la banda de valencia, que explica el aumento de la conductancia. Por el contrario, se espera que el NH_3, que se comporta químicamente como las bases de Lewis, done electrones que reducirán la concentración de huecos y, por tanto, la conductancia.

En contra de las expectativas iniciales, la molécula de NH_3 no parece ligarse al nanotubo. Sin embargo, se pueden entender los resultados experimentales considerando que hay compuestos con oxígeno previamente absorbidos y que median en la interacción entre NH_3 y nanotubos. Pero se trata de una hipótesis a corroborar.





2. En un nanotubo de carbono ideal la coordinación alrededor de cada átomo es tres (excepto en los extremos del tubo) y los átomos forman hexágonos como en el grafito. Al rotar un enlace carbono-carbono un ángulo de 90º, se produce un defecto en el que cuatro hexágonos engendran dos pentágonos y dos heptágonos. La parte inferior de la figura simula una imagen espacial de la densidad local de estados electrónicos ocupados cerca de la energía de Fermi. Se aprecia un aumento de la densidad de estados electrónicos en los pentágonos, en comparación con los hexágonos y heptágonos, lo que proporciona un entorno apropiado para el oxígeno

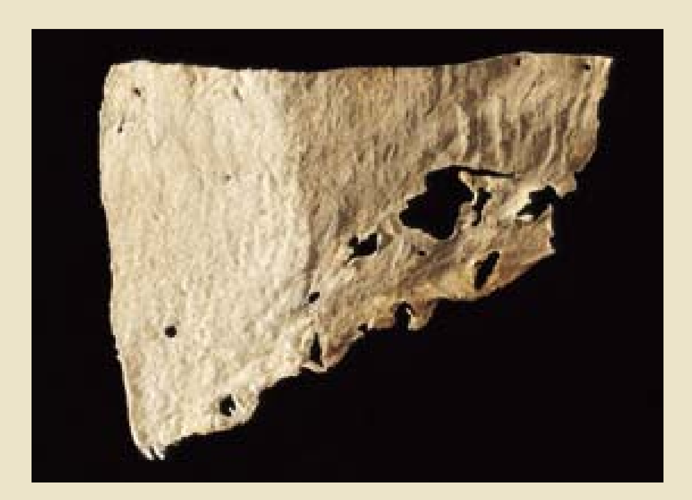
Recuperación de las pieles

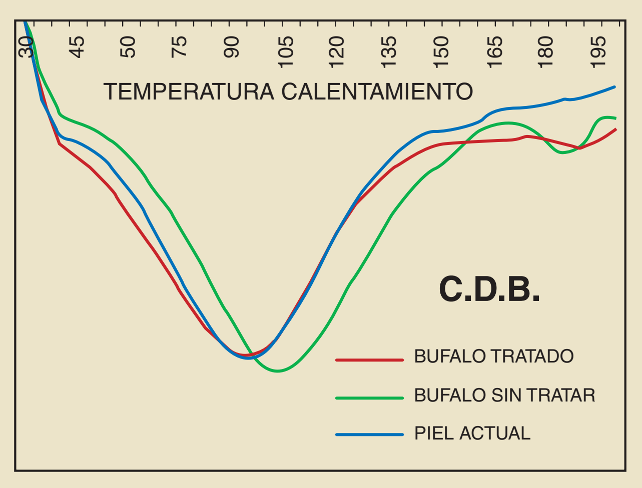
Método CURATOR

Al acometer la restauración de objetos de piel, cualquiera que el tipo de ésta sea, nos encontramos con una situación común, su pésimo estado de conservación causado por la suciedad, la deshidratación y la pérdida de nutrientes a lo largo del tiempo. La fase fundamental de la restauración supone, pues, aplicar un tratamiento que limpie, nutra e hidrate la piel.

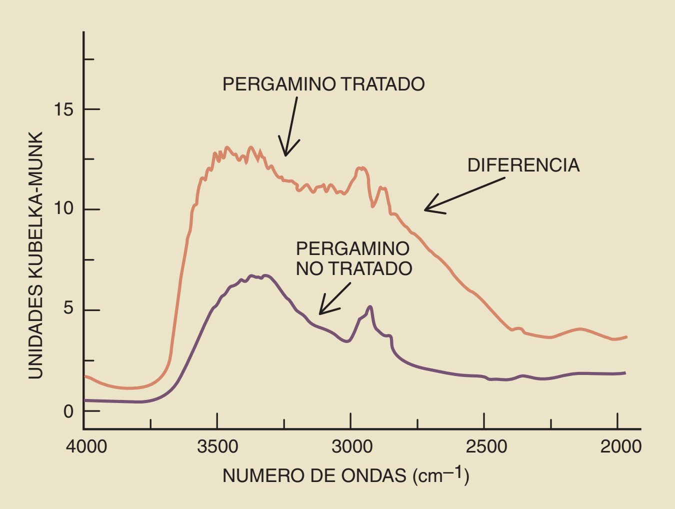
De las diferentes posibles soluciones encaminadas a lograr este objetivo, desarrollamos un tratamiento mediante colágeno, elastina y otros componentes afines y complementarios con la piel que, incorporándose a la misma, permaneciesen estables.

Empezamos los trabajos en 1985, dentro de un programa de trabajo destinado a salvar una serie de piezas museísticas de su progresivo deterioro. Ante los buenos resultados de la investigación se patentaron los productos y el método de su uso, que recibirían galardones nacionales e internacionales concedidos a la invención e innovación industrial.





1. CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE BARRIDO (CDB) *aplicada a dos muestras de piel, una de búfalo* (fotografía superior) *y otra de vacuno* (sin representar). *La primera, curtida en el siglo XVIII, presenta dos zonas diferenciadas: una sin tratar, y otra tratada hace 16 años. La piel de vacuno era de curtido reciente. Sometidas las muestras a un calentamiento de 30 grados C a 200 grados, con un gradiente de temperatura de 10 grados C por minuto, la CDB manifiesta la presencia de agua de hidratación en la muestra de piel de búfalo tratado y en la piel actual, que se pierde a menor temperatura que en la muestra de piel de búfalo sin tratar. Tras el tratamiento, la piel experimenta un proceso de recuperación que le confiere unas características similares a una piel nueva*



2. ESPECTROMETRIA INFRARROJA *mediante reflectancia difusa de un pergamino, con dos zonas diferenciadas (una tratada y otra sin tratar). El infrarrojo muestra la presencia del producto empleado en las muestras tratadas. En el gráfico, la diferencia es compatible con la presencia de ácidos grasos en el pergamino tratado*

Tras quince años de investigación sobre la conservación y recuperación de material orgánico y más de 300 piezas restauradas, se ha podido comprobar que los objetos tratados se mantienen en perfecto estado. Mediante *ensayos de resistencia* se ha observado que, sometida la piel a tensiones bajas de estiramiento y a acciones de plegado, la piel sin tratar se rompe fácilmente, mientras que, una vez tratada, ofrece mayor resistencia a la rotura, sometida tanto a tensión como a torsión.

Igualmente, se ha verificado el comportamiento interno de la piel y su respuesta al tratamiento. Existe una mayor capacidad de hidratación en las muestras tratadas que en las muestras sin tratar. Más aún, la piel tratada mantiene el agua de hidratación en el mismo rango de temperaturas que una piel nueva. El tratamiento incorpora a la piel los nutrientes y otros elementos propios de la misma.

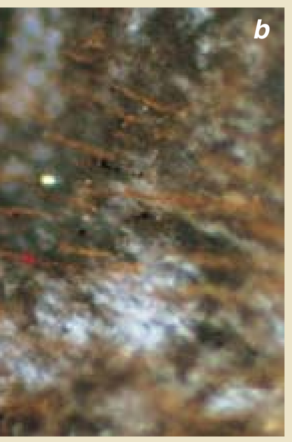
MARÍA HITA BOHAJAR
Dpto. de Conservación y Restauración
de Materiales Orgánicos

EMILIO MEZCUA SANTAMARÍA
Dpto. de Ingeniería y Control de Calidad
CURATOR Conservación Restauración, Madrid

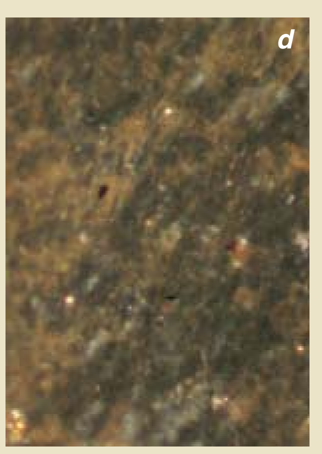
Muestra	Masa tras 24 horas, 23 °C y 25% Hr	Masa tras 24 horas, 23 °C y 60% Hr	Hidratación %
Piel de vacuno actual	0,0281	0,0295	5,0%
Piel de búfalo tratado	0,0304	0,0326	7,2%
Piel de búfalo sin tratar	0,0125	0,0127	1,6%
Pergamino tratado	0,0082	0,0093	13,4%
Pergamino sin tratar	0,0169	0,0180	6,5%
Tripa de cetáceo tratada	0,0017	0,0019	11,8%
Tripa de cetáceo sin tratar	0,0028	0,0029	3,6%

3. TRATAMIENTO CLIMATICO. Se sometieron las muestras a un período de desecación, en cabina climática, de 24 horas a una temperatura de 23 grados Celsius y una humedad relativa del 25 por ciento. A continuación, se mantuvieron durante 24 horas a una temperatura de 23 grados Celsius y una humedad relativa del 60 por ciento. Tras el acondicionamiento climático, se observa (columna hidratación) una mayor capacidad de hidratación en las muestras tratadas que en las muestras sin tratar



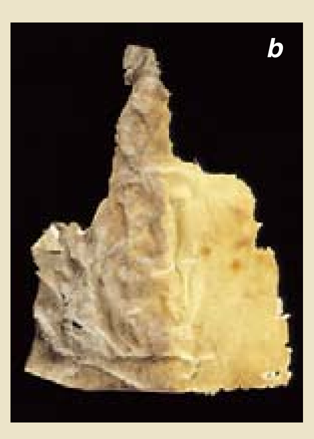






4. IMPERMEABLE DE TRIPA DE CETACEO del siglo XVIII, propiedad del Museo de América de Madrid y procedente de Alaska. Se contraponen el estado inicial (a) *y el estado final* (c), *la tripa sin tratar* (b) *y la tratada* (d). *Observada bajo microscopía óptica por transmisión se advierte que la tripa sin tratar presenta agrietamientos, una estructura de aspecto rugoso y áreas donde se pone de manifiesto una alta transmisión de luz* (zonas blancas) *debido a un menor espesor de la piel como consecuencia del deterioro. La tripa tratada ofrece, por el contrario, un aspecto más terso, liso y casi ausencia de zonas blancas debido a un mayor espesor y homogeneidad de la piel*







5. CONTRAPOSICION del estado de dos muestras de pergamino (b). *Bajo microscopía óptica por reflexión se observa que el pergamino tratado* (c) *tiene un aspecto esponjoso, brillante, similar a una piel nueva, prueba de una mayor hidratación que en el pergamino no tratado* (a)

Resulta interesante establecer una comparación con otros sensores. Trabajando en una atmósfera de argón que contiene 200 partes por millón de NO_2 el tiempo típico de respuesta del nanotubo, definido como el tiempo que se tarda en que la resistencia cambie en un orden de magnitud, está en el rango de 2 a 10 segundos. Para producir cambios significativos en la conductancia de un semiconductor bastan cantidades pequeñísimas de impurezas. La sensibilidad, cociente entre la resistencia después y antes de la exposición al gas, está entre 100 y 1000.

Por otro lado, una vez eliminado el NO_2 del medio, la conductancia de los nanotubos recupera su valor original en unas doce horas, lo que garantiza la adecuada reversibilidad del sensor. Además, si la muestra se calienta a 200 ºC el tiempo de recuperación disminuye a una hora. En comparación, un sensor de SnO_2 dopado con cadmio de altas prestaciones necesita operar a 250 ºC para detectar 100 ppm de NO_2 y tiene un tiempo de respuesta de 50 segundos, un tiempo de recuperación de 8 minutos y una sensibilidad de 300. Un sensor basado en el polipirrol, un polímero conductor, puede detectar un 0,1 % de NO_2 por un cambio del 10 % en la resistencia en cinco minutos a temperatura ambiente.

En conclusión, los sensores de nanotubos de carbono presentan la ventaja de operar a temperatura ambiente con una sensibilidad hasta mil veces mayor que la de estos otros materiales. Para el caso de la detección de NH_3 la comparación resulta igualmente favorable a los nanotubos. La pronta respuesta de los sensores de nanotubos débese a la completa exposición de su superficie al entorno químico.

La sensibilidad química se complementa con una gran capacidad para absorber gases, lo que sumado a la ligereza de los nanotubos convierte a éstos en candidatos ideales para el almacenamiento de gases. Existen ambiciosos programas de investigación en varios laboratorios para estudiar la capacidad de almacenamiento de hidrógeno en distintos materiales, en particular los formados por nanotubos. Si ésta alcanzase un umbral bien caracterizado, podríamos asistir a una revolución en la automoción, que podría basarse en un combustible no contaminante.

JULIO A. ALONSO
y ANGEL RUBIO
Universidad de Valladolid

Cohesión de cromátidas hermanos

Naturaleza y función

La información genética de los organismos se encuentra en los cromosomas, que son estructuras formadas por ácidos nucleicos (ADN) y proteínas. Para que las células puedan multiplicarse, deben llevarse a cabo dos procesos principales: la duplicación del ADN y la separación equitativa de cada par resultante de cromosomas entre las dos células hijas.

Exige la duplicación del ADN que se sintetice una copia idéntica de cada cromosoma (fase S del ciclo celular). De ello surgen dos cromátidas gemelos, que permanecen apareados y estrechamente unidos entre sí desde el momento de la síntesis hasta el de su separación durante la mitosis (fase M). A este fenómeno se le conoce como cohesión de cromátidas gemelos.

Requiere la separación equitativa de los cromátidas que la célula genere un huso acromático bipolar, del que emanan los microtúbulos. Cada par de cromátidas se une (a través de su cinetócoro) con un microtúbulo, de suerte tal que cada copia del cromosoma duplicado quede orientada hacia los polos opuestos de la célula madre.

Gracias al equilibrio entre la "fuerza de separación", ejercida por los microtúbulos sobre los cinetócoros gemelos, y la "fuerza de cohesión" entre los cromátidas, los cromosomas duplicados se alinean en el centro de la célula. Alineación que constituye un proceso esencial para la separación equitativa de los cromosomas. Si los cromátidas gemelos se separaran prematuramente, antes de formarse el huso acromático y de alinearse los cromosomas en el centro de la célula, ésta no podría distinguir cromátidas gemelos de cromosomas meramente homólogos; se generarían células con un genoma incompleto o duplicado para algunos cromosomas, causa frecuente de muerte o enfermedad en organismos pluricelulares.

En el punto de transición de metafase a anafase durante la mitosis, ocurre una separación repentina y rápida de los cromátidas gemelos hacia los polos opuestos de la célula. Se produce ese fenómeno porque hay una disolución repentina de la cohesión, lo que permite que los cromátidas viajen hacia los extremos opuestos de la célula, arrastrados por la fuerza que ejercen los microtúbulos.

Se ha avanzado bastante en el conocimiento del proceso de cohesión y separación. Ciertos estudios genéticos de levaduras (*Saccharomyces cerevisiae* y *S. pombe*) y análisis bioquímicos de vertebrados (en la rana *Xenopus laevis*) han llevado a la identificación del "complejo de cohesinas", un complejo proteínico.

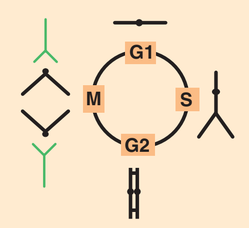
Sabemos ahora que el establecimiento y el mantenimiento de la cohesión entre cromátidas gemelos dependen de este complejo, que está formado, en *S. cerevisiae*, por al menos cuatro proteínas: Smc1p, Smc3p, Scc1p (también llamado Mcd1p) y Scc3p. En *S. pombe*, a la proteína homóloga de Scc1p/Mcd1p se la denominó Rad21p; interviene en la reparación del ADN y la segregación cromosómica. Las proteínas Smc1p y Smc3p pertenecen a la familia de las proteínas SMC ("mantenimiento estructural de cromosomas"), que es un grupo de ATPasas cromosómicas que persiste desde bacterias hasta humanos (*véase la figura*).

Esas cuatro proteínas del complejo de cohesinas son esenciales para la viabilidad en levadura. Las mutaciones en cualquiera de ellas provocan la separación prematura de los cromátidas gemelos.

Por otro lado, la utilización de extractos mitóticos de ovocitos de *Xenopus laevis* permitió la purificación y caracterización bioquímica del complejo de cohesinas en vertebrados. Los experimentos *in vitro* acometidos en dicho sistema establecieron que el complejo de cohesinas en vertebrados lo componían homólogos de las cuatro proteínas presentes en el mismo complejo en levadura. También dejaron sentado que la inmunodepleción del complejo de cohesinas produce defectos en la cohesión durante la mitosis subsiguiente.

Se ha propuesto que el complejo de cohesinas actúa como un "pegamento proteínico" que une ambos cromátidas. La investigación de la estructura de las proteínas Smc en bacterias señala que las proteínas en cuestión podrían formar una estructura en V, compuesta por dos moléculas asociadas, en orientación opuesta, que configuran dos brazos largos conectados por una bisagra flexible, y cuyos extremos estarían en contacto con el ADN, cada uno con un cromátida gemelo (*véase la figura*).

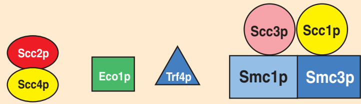
A. Ciclo de los cromosomas



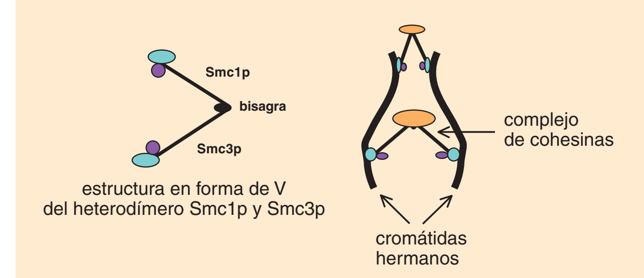
El ciclo celular eucariótico consta de cuatro fases: G1, S, G2 y M. En la fase G1, los cromosomas forman unas hebras largas de ADN y proteínas. Durante la fase S, o síntesis, se lleva a cabo la duplicación de cada cromosoma: se producen dos copias idénticas de cada cromosoma (cromátidas gemelos), que permanecen estrechamente unidos entre sí gracias al proceso de cohesión. Durante la fase G2, cada cromosoma está formado por dos cromátidas apareados en longitud por múltiples complejos de cohesinas. Al principio de la fase M, los cromosomas se acomodan en el centro de la célula donde cada cromátida gemelo se une a un microtúbulo. En el momento de la transición de metafase a anafase hay una disolución repentina de la cohesión y cada cromátida migra, arrastrado por los microtúbulos, hacia cada extremo de la célula madre.

Existen por lo menos ocho proteínas necesarias para la cohesión. Se trata del complejo formado por las proteínas Scc2p y Scc4p, imprescindible para que se establezca la cohesión entre cromátidas, lo que requiere también la presencia de la proteína Eco1p/Ctf7p durante la síntesis del ADN; la proteína Trf4p (Pol κ), que es una polimerasa del ADN y una cohesina, y el complejo de cohesinas formado por otras 4 proteínas más: Smc1p, Smc3p, Scc1p y Scc3p.

B. Proteínas necesarias para la cohesión

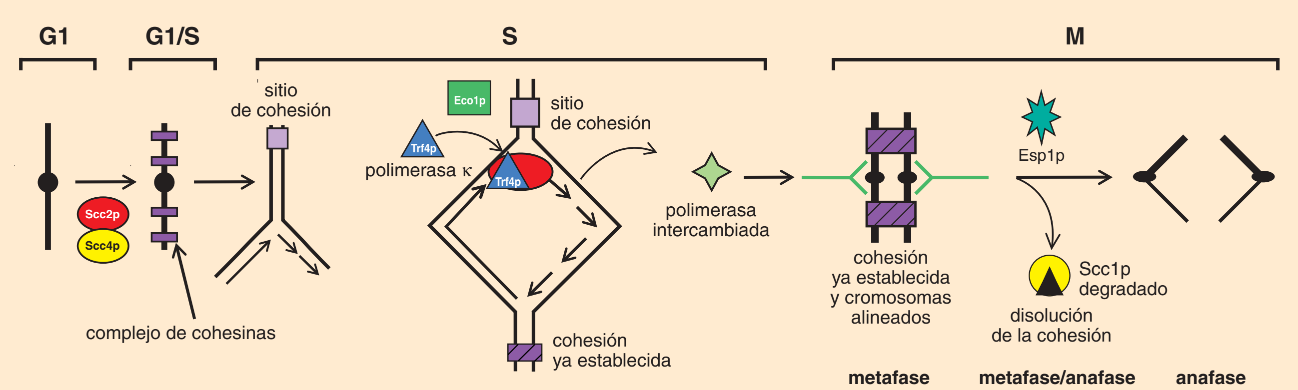


C. Estructura de las proteínas Smc1p y Smc3p



Los extremos amino y carboxilo de las proteínas Smc1p y Smc3p pueden unirse al ADN. Una molécula de Smc1p y una de Smc3p se asocian en orientación opuesta y forman una estructura flexible en V, cuyos extremos se unen al ADN; aparece así una estructura con características ideales para acercar y mantener unidas dos moléculas de ADN. El dibujo muestra esquemáticamente el modelo de la cohesión. Se cree que cada extremo del complejo de cohesinas se une a cada una de los cromátidas gemelos; la bisagra permite acercar moléculas que estén más separadas.

D. Establecimiento de la cohesión



Establecimiento, mantenimiento y disolución de la cohesión entre los cromátidas gemelos. Durante la fase G1 del ciclo celular, los cromosomas constan de una fibra de ADN y proteínas. Las proteínas de la cohesión no se unen todavía a los cromosomas. En la transición entre las fases G1 y S, un complejo integrado por las proteínas Scc2p y Scc4p facilita la interacción entre las cohesinas y el ADN. Durante la fase S, se establece la cohesión entre los cromátidas gemelos, para lo cual es necesaria la actividad de la proteína Eco1p/Ctf7p. Se ha propuesto que, cuando la maquinaria de replicación se encuentra con un sitio de cohesinas, la polimerasa κ (Trf4p) se intercambia por la polimerasa presente en el complejo de replicación. Durante la metafase (fase M), los cromosomas se acomodan en el centro de la célula y cada cromátida gemelo se une a un microtúbulo. En el punto de transición de metafase a anafase se produce la disolución repentina de la cohesión; la fuerza que ejercen los microtúbulos arrastra entonces cada cromátida gemelo hacia los polos opuestos de la célula.

Durante la transición de metafase a anafase hay una disolución rápida de la cohesión, que depende de la proteína Esp1p y promueve la degradación de Scc1p/Mcd1p. Tal degradación de Scc1p/Mcd1p podría desestabilizar la cohesión al inducir la disociación entre el complejo de cohesinas y los cromosomas, lo que induciría la separación de éstos hacia los polos opuestos de la célula madre.

Existen también otras moléculas consideradas como cohesinas que, aunque no forman parte del complejo de cohesinas, son indispensables para el establecimiento, el mantenimiento o ambos de la cohesión. Se trata de Eco1p/Ctf7p, Scc2 y Scc4p. Eco1p/Ctf7p es necesaria para establecer la cohesión durante la fase S, pero no para mantenerla durante las fases G2 o M. Por su parte, Scc2p y Scc4p forman un complejo aparte cuya actividad se precisa para la asociación del complejo de cohesinas con los cromosomas.

A pesar de que las cohesinas se adhieren al ADN antes de la fase S en levadura, la cohesión no es eficaz si no va acompañada de la síntesis del ADN; posiblemente, a medida que los cromátidas van emergiendo de la burbuja de replicación. De acuerdo con estudios genéticos en levadura se daría una conexión entre la polimerización del ADN y el establecimiento de la cohesión. De hecho, la proteína Trf4p de *S. cerevisiae* es una polimerasa de ADN llamada *pol* κ, y mutaciones en ésta producen defectos en el mantenimiento de la cohesión de los cromátidas. Quizá los factores que establecen la cohesión necesitan de la proximidad de una polimerasa del ADN; y cuando la maquinaria de polimerización se encuentra con un sitio de cohesión, se intercambia la polimerasa por Trf4p para polimerizar este sitio.

No obstante los avances en el conocimiento de los procesos de cohesión entre los cromátidas gemelos, así como de sus procesos de separación durante la mitosis, quedan por dilucidar no sólo los mecanismos moleculares y estructurales de tales procesos, sino también la manera en que determinados errores en ellos pueden provocar enfermedades.

IRENE CASTAÑO
Departamento de Genética y Biología Molecular
Universidad Johns Hopkins
Baltimore

Esponjas

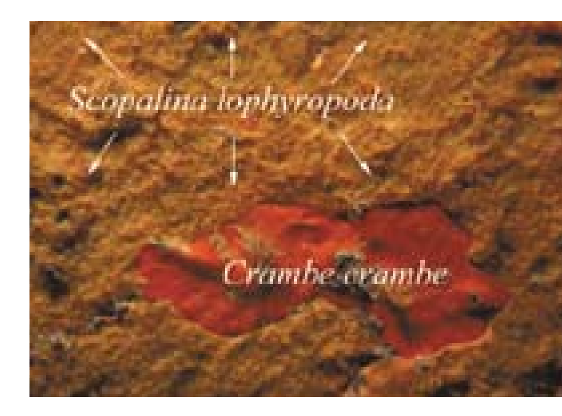
Cooperación entre reproducción asexual y sexual

Ningún organismo se encuentra distribuido de manera uniforme sobre el planeta. La existencia de discontinuidades en el ambiente provoca que las especies queden geográficamente fragmentadas, formando poblaciones más o menos separadas por zonas que les resultan inhabitables. La aparición de nuevas poblaciones fuera del límite de distribución conocido para una especie sólo puede deberse a que al menos un individuo o un propágulo reproductor ha llegado allí desde otra población; observación que se predica incluso de los organismos más sedentarios. A este respecto, las esponjas marinas ofrecen un problema particularmente interesante.

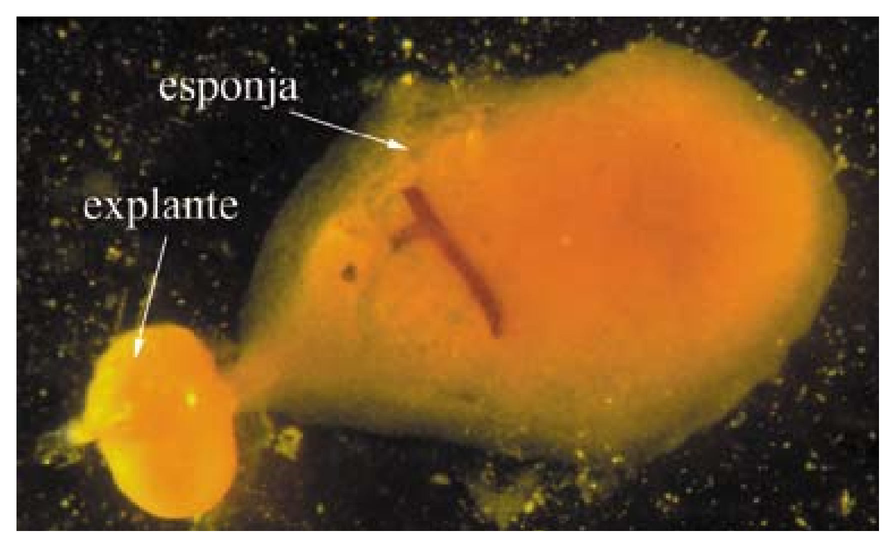
Este grupo constituye un ejemplo paradigmático de ubicuidad, estando bien representado en casi todas las profundidades y desde el ecuador hasta los mares polares. Sin embargo, su potencial colonizador es teóricamente muy limitado. Los adultos viven fijos sobre el fondo; la dispersión de las especies queda a cargo de unas pequeñas larvas (0,5-2 mm) ciliadas nadadoras, que aparecen por reproducción sexual, generalmente una vez por año. La motilidad de la larva es muy limitada y su incapacidad para alimentarse sólo le permite vivir muy pocos días en el plancton. Por ello, raramente aparecen larvas de esponjas en muestras de agua oceánica; tampoco en muestras tomadas más allá de unas pocas decenas de metros de la costa. Resulta, por tanto, muy difícil explicar la existencia de esponjas con poblaciones distribuidas por varios mares o a lo largo de cadenas de islas oceánicas separadas entre sí por decenas de kilómetros.

A primera vista, la razón se escondería en sus múltiples formas de transporte pasivo, además de la dispersión larvaria: fragmentos capaces de reorganizar un individuo completo, yemas de reproducción asexual y esponjas pequeñas establecidas sobre substratos ligeros, arrastrados por las corrientes.

Pero las posibilidades de éxito de todos estos mecanismos son virtualmente nulas. El miembro fundador tendría que multiplicarse por métodos asexuales, originando una



1. Colonia de Scopalina lophyropoda (naranja) *en torno a otra, menor, de* Crambe crambe (rojo)



2. Un fragmento de tejido sin reorganizar (explante) *junto a otro en avanzada fase de progreso hacia su conversión en esponja*

población de individuos clónicos condenada a la extinción, ya que cualquier intento de reproducción sexual sería una autofecundación. Para que una incipiente población fundadora no se hunda por efecto de la consanguinidad, se requiere la llegada de más de un genotipo al nuevo hábitat.

Ahora bien, la posibilidad de que las corrientes y turbulencias arrastren más de un propágulo hasta el mismo lugar remoto, de que al menos dos de ellos se establezcan y sobrevivan hasta la madurez y de que sus gametos se crucen para iniciar una nueva población es mínima.

O así se suponía hasta que abordamos la reproducción en *Scopalina lophyropoda*, una demosponja bastante común en el infralitoral mediterráneo español. Se ha descubierto un mecanismo que permite que la posibilidad insignificante aludida en el párrafo anterior se torne alta probabilidad.

Como muchas otras esponjas, tras la fecundación, *S. lophyropoda* incuba los embriones en su interior hasta el estado de larva. Las larvas son entonces expulsadas al exterior a través de los canales acuíferos. La etapa planctónica de la larva dura sólo 2,5 días en promedio. De ahí que se creyera que los nuevos individuos originados por estas larvas se establecerían dentro de los límites de la población parental o en sus aledaños.

Sin embargo, se desconocía que el potencial de dispersión puede verse aumentado notablemente si las esponjas son fragmentadas cuando están en proceso de gestación. Las colonias de esponjas pueden romperse en cualquier época del año por perturbaciones físicas (oleaje o rotura del substrato) y biológicas (mordisqueo y actividades erosivas de peces e invertebrados).

Los fragmentos desprendidos se redondean rápidamente y forman explantes, bolas de tejido indiferenciado. Estas tornan a ser resuspendidas y dispersadas por las corrientes. Pero si los explantes permanecen inmóviles sobre un substrato adecuado durante 2-3 días, terminan por fijarse en él, convertidos en pequeñas esponjas funcionales, genéticamente idénticas (clones) a la esponja fragmentada.

Ese método de propagación asexual entre las esponjas se conocía desde antiguo. El interés de nuestro hallazgo reside en que si la fragmentación tiene lugar en esponjas reproductoras, pedazos de tan sólo 1 o 2 mm de diámetro pueden contener varios embriones.

En condiciones normales, el desarrollo embrionario requiere la presencia de un pseudoepitelio placentario y de células nodrizas del embrión. Pero tales estructuras hísticas se desorganizan en el fragmento desprendido, que se desdiferencia para tornar a ser una bola de tejido totipotente. En tal estado, cabría suponer que los embriones contenidos en los explantes se resorbieran y cedieran su contenido energético al proceso de reorganización del explante en esponja. No siempre acontece eso.

Contra todo pronóstico, los embriones son capaces de completar su desarrollo hasta larva en el interior de las bolas de tejido. Si el explante se convierte en esponja antes de que termine la embriogénesis, se forma una cámara de incubación que comunica con el exterior por un conducto, a través del cual serán liberadas las larvas.

Cuando la embriogénesis concluye antes de que el explante se convierta en esponja, porque el substrato no es adecuado o porque el hidrodinamismo lo impide, las larvas se abren camino hacia el exterior, atravesando la masa de tejido desorganizado del explante.

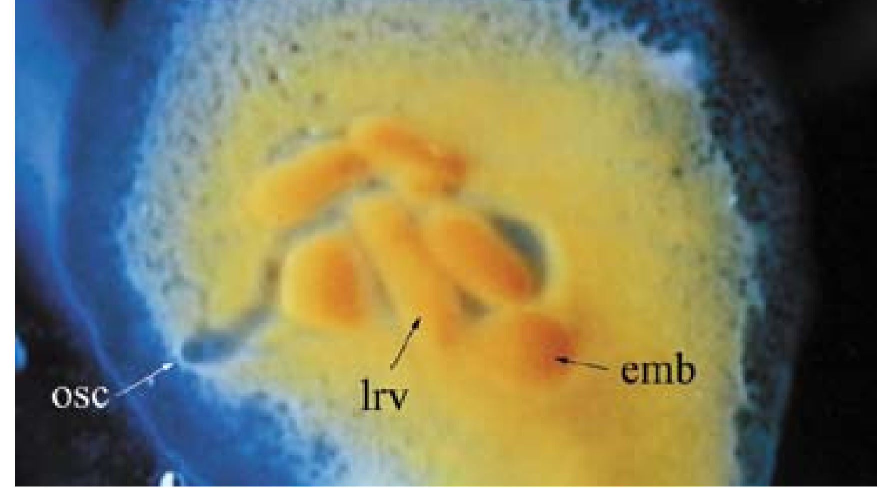
En nuestros experimentos, los fragmentos tardaron de tres a 28 días en convertirse en esponjas. Aunque no podemos determinar la distancia a la que podría llegar un fragmento de 1-2 mm durante ese intervalo temporal, se sabe que fragmentos mucho mayores arrancados por las tormentas se propagan a lo largo de kilómetros, con gran rapidez.

Mientras las corrientes dispersan los fragmentos, los embriones se van desarrollando en el interior. Por tanto, la reproducción sexual y asexual cooperan para maximizar la dispersión del propágulo sexual (la larva) por adición de la dispersión previa experimentada por el propágulo asexual (el fragmento).

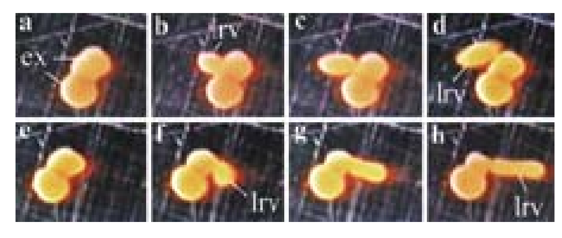
Y lo que es aún más importante, la dispersión de fragmentos portadores de embriones maximiza la probabilidad de que genotipos diferentes alcancen simultáneamente un nuevo hábitat, reduciendo la consanguinidad del episodio fundador y aumentando la probabilidad de establecer una población viable. La dispersión sólo adquiere valor si el propágulo dispersivo establece una nueva población.

Aunque nuestro estudio se ha limitado a una sola especie, puede afirmarse que probablemente ese mecanismo de colonización, simple y eficiente, lo utilizan numerosas esponjas.

MANUEL MALDONADO,
MARÍA JESÚS URIZ,
M.ª CARMEN CARMONA
Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CSIC).



3. *Esponja reorganizada desde un fragmento. Se aprecian las larvas* (lrv) *y embriones* (emb) *en una cámara de incubación con salida al exterior por el ósculo* (osc)

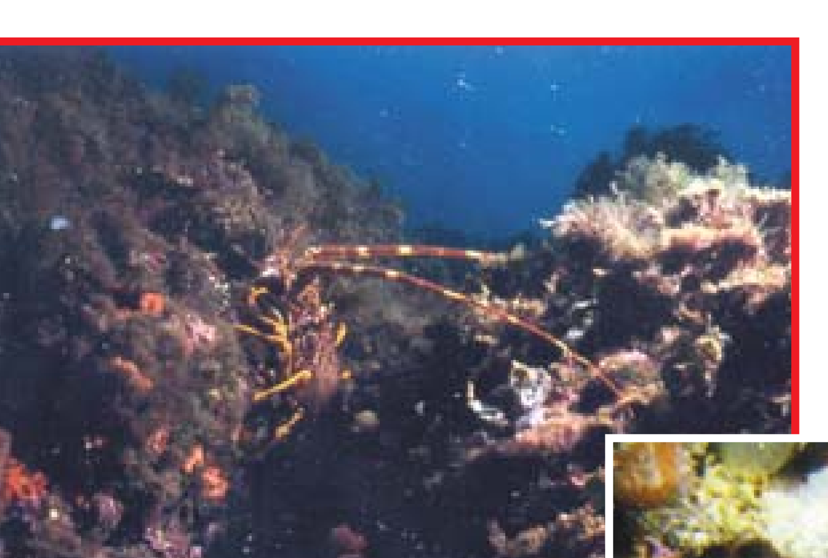


4. *Secuencia de liberación de dos larvas* (lrv) *desde un fragmento de tejido* (ex) *que aún no se ha reorganizado en esponja*

De cerca

Texto y fotos: David Díaz, Marc Marí y Pere Abelló

Juveniles de langosta



1. Hábitat típico de la langosta (Palinurus elephas): *formaciones rocosas coralígenas, con abundancia de grietas, a unos 30 metros de profundidad*

2. Juvenil de langosta recién asentada en un agujero de dátil de mar a 12 m de profundidad. El mejor período del año para observar langostas recién asentadas en el Mediterráneo son los meses de junio y julio

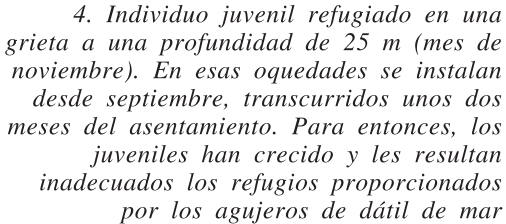
La langosta común europea (*Palinurus elephas*) es uno de los animales más emblemáticos de la fauna marina costera del Mediterráneo. Sus poblaciones se concentran en rocas sumergidas con una amplia disponibilidad de agujeros, cuevas y grietas. Pero la densidad demográfica es baja. Además, al tratarse de una especie longeva y con una tasa de crecimiento discreta, se resienten de la pesca.

La fase larvaria de *P. elephas* presenta unas características peculiares. Su vida planctónica perdura de 5 a 6 meses. La morfología de los filosomas, así se llaman esas larvas transparentes, en nada recuerda a la de un ejemplar adulto. La última muda da lugar al puérulus, que ha adquirido ya el aspecto típico de la langosta adulta. También el puérulus es transparente, vive en el plancton y constituye la fase que termina por regresar al fondo costero para unirse a las poblaciones adultas. Es el asentamiento.

En el Mediterráneo el asentamiento de la langosta se produce a finales de primavera y principios de verano. El decápodo, que se instala entre los 10 y los 15 m de profundidad, prefiere en un comienzo paredes verticales y zonas esciáfilas. Busca, al principio, los agujeros vacíos de dátil de mar, *Lithophaga lithophaga*, excavados por este molusco en la roca caliza. A medida que los juveniles van incrementando, mediante mudas, su talla, los agujeros de dátiles dejan de serles adecuados y las langostas se mueven hacia grietas a mayor profundidad.



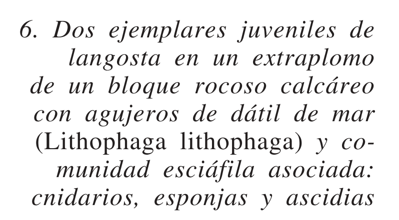
3. La coloración de los ejemplares juveniles recién asentados difiere de la pigmentación de los adultos. Aquéllos presentan una franja longitudinal clara en el abdomen y nula o escasa pigmentación en las antenas



4. Individuo juvenil refugiado en una grieta a una profundidad de 25 m (mes de noviembre). En esas oquedades se instalan desde septiembre, transcurridos unos dos meses del asentamiento. Para entonces, los juveniles han crecido y les resultan inadecuados los refugios proporcionados por los agujeros de dátil de mar



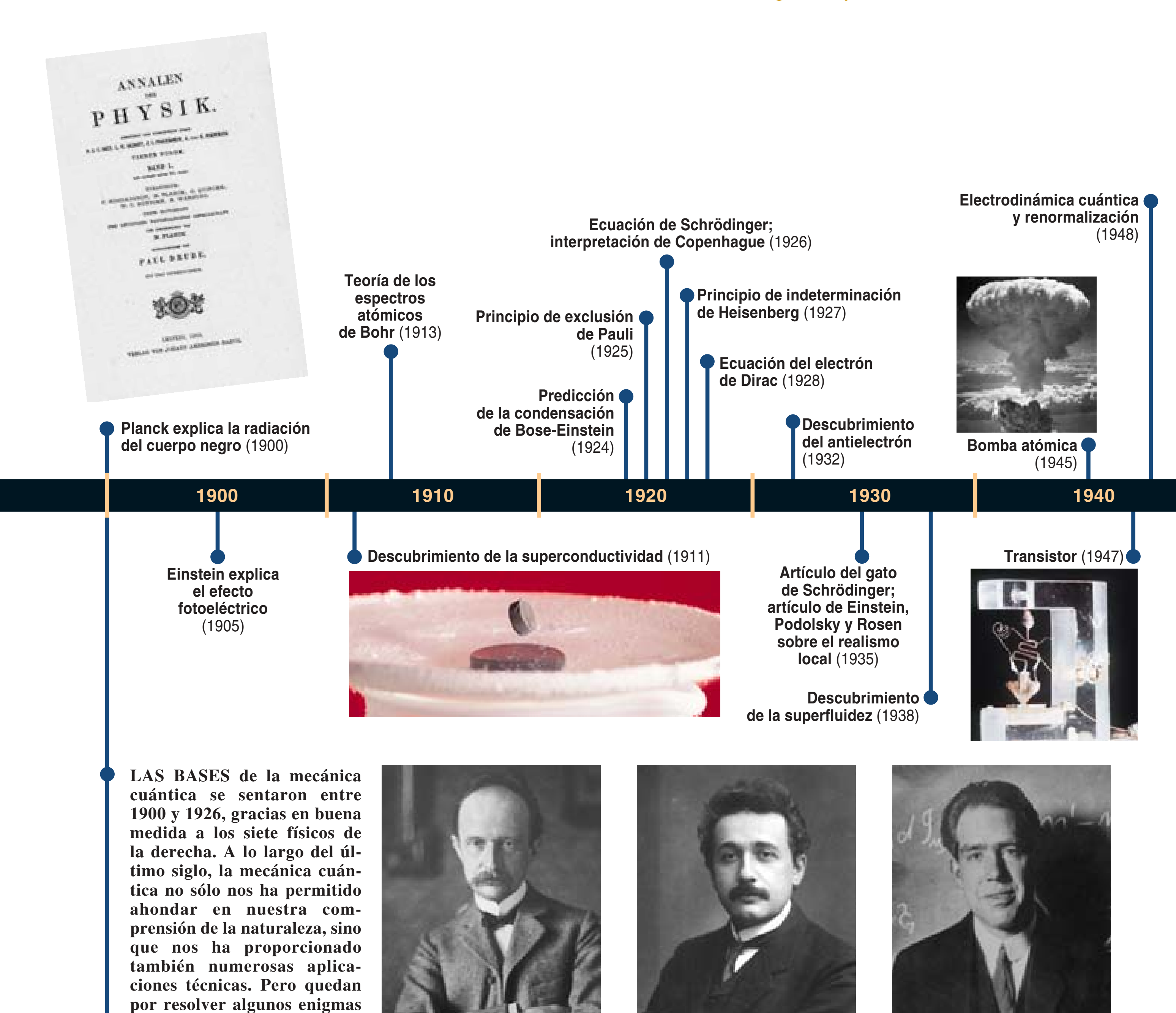
5. Juvenil de langosta en el mes de agosto, con coloración ya de individuo adulto. Durante la noche salen de los refugios diurnos en busca de alimento



6. Dos ejemplares juveniles de langosta en un extraplomo de un bloque rocoso calcáreo con agujeros de dátil de mar (Lithophaga lithophaga) *y comunidad esciáfila asociada: cnidarios, esponjas y ascidias*

CIEN AÑOS DE MISTERIOS CUANTICOS

Max Tegmark y John Archibald Wheeler



LAS BASES de la mecánica cuántica se sentaron entre 1900 y 1926, gracias en buena medida a los siete físicos de la derecha. A lo largo del último siglo, la mecánica cuántica no sólo nos ha permitido ahondar en nuestra comprensión de la naturaleza, sino que nos ha proporcionado también numerosas aplicaciones técnicas. Pero quedan por resolver algunos enigmas fundamentales.

MAX PLANCK (1858–1947)

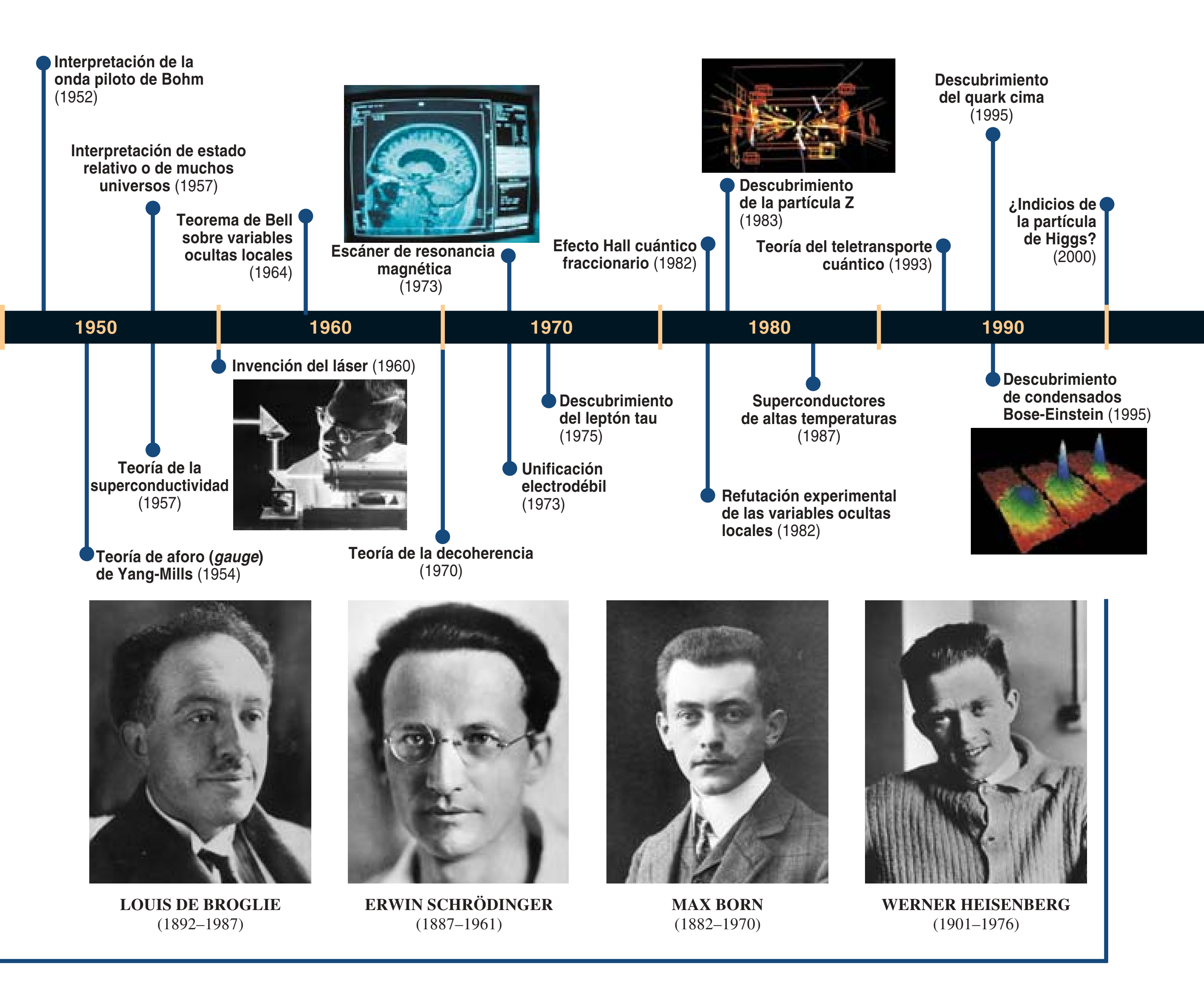
ALBERT EINSTEIN (1879–1955)

NIELS BOHR (1885–1962)

La mecánica cuántica cumple cien años combinando éxitos espectaculares con enigmas persistentes

"En unos pocos años habremos determinado con una buena aproximación las grandes constantes de la física, y... la única ocupación de los hombres de ciencia será extender las medidas a un nuevo decimal." Recién llegados al siglo XXI, en plena celebración de los logros anteriores, estas palabras resultan familiares. Pero la frase fue pronunciada por James Clerk Maxwell en 1871, en la clase magistral que impartió con motivo de su incorporación a la Universidad de Cambridge; expresaba el sentir común por aquel entonces (aunque él no lo compartiera). Treinta años después, el 14 de diciembre de 1900, Max Planck anunció su fórmula para el espectro del cuerpo negro y dio así el disparo de salida de la revolución cuántica.

Abordamos aquí los primeros cien años de la mecánica cuántica, prestando especial atención al lado misterioso de la teoría, para culminar en el debate abierto sobre cuestiones que van de la computación cuántica a la naturaleza misma de la realidad física, pasando por la conciencia y los universos paralelos. Nos sorprenderíamos de la cantidad asombrosa de aplicaciones científicas y prácticas de la mecánica cuántica. Alrededor del 30 % del producto interior bruto de los Estados Unidos depende de inventos basados en la mecánica cuántica; por citar algunos: semiconductores de los chips de los ordenadores, láser de los lectores de discos compactos o aparatos de formación de imágenes por resonancia magnética de los hospitales.



LOUIS DE BROGLIE (1892–1987)

ERWIN SCHRÖDINGER (1887–1961)

MAX BORN (1882–1970)

WERNER HEISENBERG (1901–1976)

NAIPES CUANTICOS

LA CAIDA DEL NAIPE DA PIE A UN MISTERIO CUANTICO

Según la física cuántica, un naipe ideal en equilibrio perfecto sobre uno de sus bordes caerá en ambos sentidos a la vez; es lo que se conoce como superposición. La función de onda cuántica del naipe (*azul*) varía continuamente, sin saltos, desde el estado de equilibrio (*izquierda*) hasta el misterioso estado final (*derecha*), en el cual parece que el naipe esté en dos lugares a la vez. Aunque el experimento no es factible con un naipe real, se han puesto de manifiesto situaciones análogas en ocasiones innumerables con electrones, átomos y objetos mayores. Uno de los retos más persistentes y fundamentales de la mecánica cuántica consiste en comprender el significado de tales superposiciones y saber por qué no las vemos nunca en el mundo que nos rodea. A lo largo de varias décadas, los investigadores han desarrollado diversas ideas para resolver este enigma, entre las que se cuentan las interpretaciones rivales de Copenhague y de los muchos universos, sobre la función de onda, y la teoría de la decoherencia.



En 1871, los científicos tenían buenas razones para sentirse optimistas. La mecánica clásica y la electrodinámica habían impulsado la revolución industrial, y sus ecuaciones fundamentales parecían bastar para describir todas las propiedades de los sistemas físicos. Algunos detalles insignificantes empañaban la imagen. Así, el espectro calculado para la luz emitida por un objeto incandescente no coincidía con las observaciones. La predicción clásica se conocía como la catástrofe ultravioleta, porque según ella una intensa radiación ultravioleta, acompañada de rayos X, debería cegarnos al contemplar el elemento incandescente de una estufa.

El desastre del hidrógeno

En su artículo de 1900 Planck consiguió deducir el espectro correcto. Mas, para ello, hubo de introducir una hipótesis tan extraña, que estuvo años sin creer realmente en ella: toda la energía se emitía en cantidades discretas, o cuantos. Esta enigmática hipótesis resultó ser acertada.

En 1905 Albert Einstein avanzó un paso más, al proponer que la radiación sólo podía transportar energía en pequeños paquetes, o "fotones", y explicar de esta manera el efecto fotoeléctrico, gracias al cual funcionan hoy las baterías solares y los sensores de imagen de las cámaras digitales.

La física volvió a pasar apuros en 1911. Ernest Rutherford argumentó de manera convincente que los átomos consistían en electrones que orbitaban en torno a un núcleo dotado de carga positiva, a la manera de un sistema solar en miniatura. Según la teoría electromagnética, sin embargo, los electrones en órbita emitirían radiación continuamente y se precipitarían sobre el núcleo en una billonésima de segundo. Pero los átomos de hidrógeno eran muy estables. Tal discrepancia representa el error cuantitativo más grave de toda la historia de la física, ya que estima a la baja la vida media del hidrógeno en unos 40 órdenes de magnitud.

En 1913 Niels Bohr, que había ido a la Universidad de Manchester para trabajar con Rutherford, dio con una explicación que nuevamente implicaba a los cuantos. Postuló que el momento angular de los electrones sólo podía tomar ciertos valores definidos, que confinarían a los electrones en un conjunto discreto de órbitas. Los electrones sólo podrían emitir energía saltando a una órbita inferior y emitiendo un fotón. Al alcanzar la órbita más cercana al núcleo, el electrón no tenía donde saltar y se formaba un átomo estable.

La teoría de Bohr daba cuenta también de muchas de las líneas espectrales del hidrógeno, es decir, las frecuencias específicas de la luz emitida por los átomos excitados. La teoría funcionaba con el átomo de helio, pero sólo si se ignoraba uno de sus dos electrones. De vuelta a Copenhague, Bohr recibió una carta de Rutherford que le instaba a publicar sus resultados, pero el danés respondió que nadie le creería a menos que explicara el espectro de todos los elementos. Rutherford insistió que, si explicaba el hidrógeno y el helio, el resto no plantearía problemas.

Pese a los éxitos de la idea de los cuantos, los físicos todavía no sabían qué pensar de estas reglas extrañas y aparentemente arbitrarias. En 1923, Louis de Broglie propuso una respuesta en su tesis doctoral: los electrones y otras partículas actúan como ondas estacionarias, ondas que, cual vibraciones de una cuerda de guitarra, adoptan ciertas frecuencias discretas (cuantizadas). La idea se salía tanto de lo normal, que el tribunal de tesis tuvo que recabar la ayuda de Einstein, que emitió un informe favorable.

En noviembre de 1925 Erwin Schrödinger dio un seminario en Zurich sobre el trabajo de De Broglie. Al terminar, Peter Debye le preguntó que, tratándose de ondas, dónde estaba la ecuación de ondas. Schrödinger dedujo entonces la ecuación que lleva su nombre, donde se en-

MAX TEGMARK y JOHN ARCHIBALD WHEELER mantuvieron numerosas conversaciones sobre mecánica cuántica durante los tres años y medio que el primero pasó como investigador postdoctoral en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Tegmark enseña física en la Universidad de Pennsylvania. Wheeler, discípulo de Niels Bohr, es profesor emérito de física en Princeton, donde tuvo entre sus alumnos a Richard Feynman y Hugh Everett III.

cierra la llave de buena parte de la física moderna, al tiempo que Max Born, Pascual Jordan y Werner Heisenberg proponían una formulación matricial equivalente. Gracias a esta sólida fundamentación matemática, la teoría cuántica realizó progresos espectaculares. En pocos años, los físicos explicaron multitud de resultados experimentales, desde los espectros de átomos más complicados hasta las propiedades de las reacciones químicas. Pero seguía sin saberse qué era esa "función de ondas" que verificaba la ecuación de Schrödinger. Es el interrogante central de la mecánica cuántica, que permanece abierto.

A Born se le ocurrió que la función de onda podía interpretarse en clave probabilista. Cuando los físicos experimentales miden la posición de un electrón, la probabilidad de hallarlo en una región determinada depende de la magnitud de la función de onda en esa región. Esta interpretación concedía al azar un papel fundamental en las leyes de la naturaleza, una conclusión que inquietaba profundamente a Einstein, quien expresó su preferencia por un universo determinista con la célebre frase "No puedo creer que Dios juegue a los dados".

Gatos curiosos y naipes cuánticos

Tampoco Schrödinger se sentía satisfecho. Las funciones de onda podían describir combinaciones de distintos estados, las llamadas superposiciones. Un electrón, por ejemplo, podía estar en una superposición de distintas posiciones. Para Schrödinger, si los átomos y otros cuerpos microscópicos podían estar en extrañas superposiciones, por qué no iban a estarlo los objetos macroscópicos, hechos de átomos. E ideó un ejemplo rebuscado: el famoso experimento mental en el que un dispositivo perverso acaba con un gato si un átomo radiactivo se desintegra. Puesto que el átomo radiactivo se halla en una superposición de desintegrado y no desintegrado, produce un gato que está a la vez vivo y muerto, en superposición.

El recuadro "Naipes cuánticos" muestra una variante sencilla de este experimento mental. Consiste en tomar un naipe con un borde impecable y colocarlo en equilibrio sobre una mesa. Según la física clásica, el naipe permanecerá en equilibrio indefinidamente. Según la ecuación de Schrödinger, caerá a los pocos segundos aunque esté perfectamente equilibrado, y lo hará en ambos sentidos, a derecha y a izquierda, en superposición.

Si acometiéramos ese experimento ideal con un naipe de verdad, concluiríamos sin duda que la física clásica está equivocada y que el naipe cae; siempre lo veríamos caer al azar a la derecha *o* a la izquierda, nunca en ambos sentidos a la vez, como pretende la ecuación de Schrödinger. Semejante contradicción aparente está relacionada con uno de los misterios originales y más persistentes de la mecánica cuántica.

La interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, que se fraguó en los intercambios que mantuvieron Bohr y Heisenberg a finales de los años veinte del siglo XX, aborda este misterio a partir del carácter especial de las observaciones o las mediciones. Mientras no observamos el naipe en equilibrio, su función de onda evoluciona de acuerdo con la ecuación de Schrödinger; se trata de una evolución continua y gradual que recibe el nombre matemático de "unitaria" y que tiene diversas propiedades interesantes. La evolución unitaria produce la superposición en la cual el naipe ha caído tanto a la izquierda como a la derecha, pero el acto de observarlo provoca un cambio brusco en la función de onda, lo que se conoce como un "colapso": el observador ve el naipe en un estado clásico determinado (cara arriba o cara abajo) y a partir de ese momento sólo subsiste la parte correspondiente de la función de onda. Es como si la naturaleza seleccionara un estado al azar, de acuerdo con las probabilidades que determina la función de onda.

La interpretación de Copenhague permitió calcular en detalle, con sorprendente eficacia, el resultado de los experimentos, pero no eliminó la sospecha de que alguna ecuación debía describir cuándo y cómo se produciría el colapso de la función de onda. Para muchos físicos, el no disponer de esta ecuación significaba que la mecánica cuántica era intrínsecamente defectuosa, y que pronto la sustituiría una teoría más fundamental que incluiría dicha ecuación. Por ello, en lugar de debatir las implicaciones ontológicas de las ecuaciones, la mayoría de los físicos se dedicó a desarrollar las numerosas aplicaciones

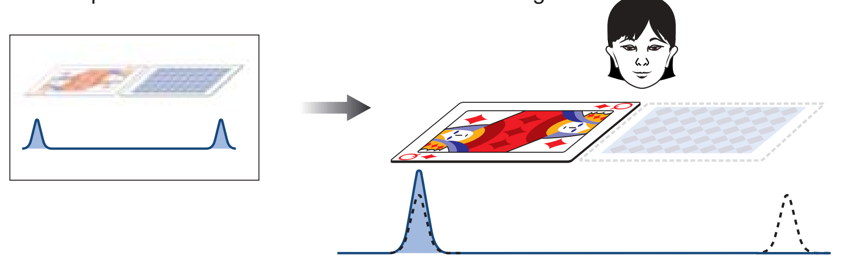
LA INTERPRETACION DE COPENHAGUE

IDEA: Los observadores ven un resultado aleatorio; la probabilidad viene dada por la función de onda.

VENTAJAS: Sólo se da un resultado, que coincide con lo que observamos.

INCONVENIENTES: Precisa el "colapso" de la función de onda, pero ninguna ecuación especifica cuándo se producirá.

Cuando se mide o se observa una superposición cuántica, vemos al azar una u otra de las dos alternativas, con probabilidades que vienen dadas por la función de onda. Si una persona ha apostado que el naipe caerá cara arriba, la primera vez que lo mira tiene un 50 % de posibilidades de alegrarse por haber ganado la apuesta. Esta interpretación ha sido aceptada en la práctica por los físicos durante mucho tiempo, pese a que exige un cambio brusco o colapso de la función de onda que contradice la ecuación de Schrödinger.

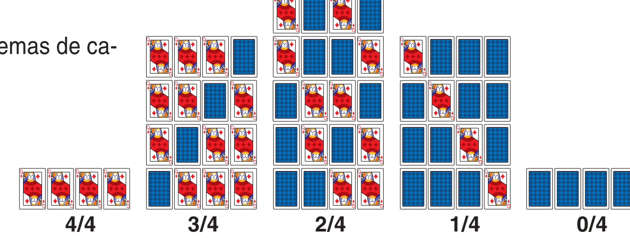


INTERPRETACION DE LOS MUCHOS UNIVERSOS

IDEA: Las superposiciones aparecerán como universos alternativos paralelos a sus habitantes.

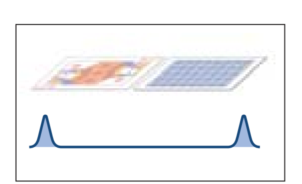
VENTAJAS: La ecuación de Schrödinger se cumple siempre; la función de onda no se colapsa jamás.

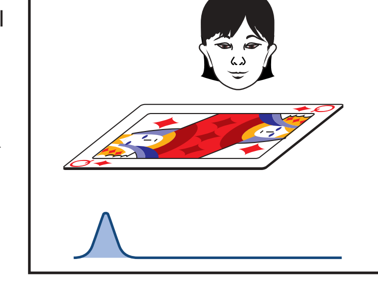
INCONVENIENTES: Idea arriesgada que todavía plantea problemas de carácter técnico.

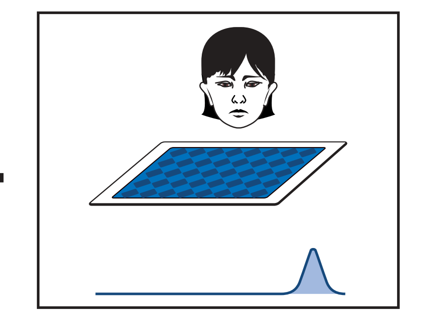


PROBABILIDADES DE GANAR SI SE DEJAN CAER CUATRO NAIPES

Si las funciones de onda nunca se colapsan, la ecuación de Schrödinger predice que la persona que contempla la superposición del naipe entrará en una superposición de dos posibles resultados: ganar o perder la apuesta. Estas dos partes de la función de onda total (de la persona y del naipe) evolucionan independientemente, como dos mundos paralelos. Si se repite el experimento muchas veces, la gente que habita la mayoría de los universos paralelos verá que el naipe cae hacia arriba aproximadamente la mitad de las veces. Los naipes apilados de la derecha muestran los 16 universos que genera el dejar caer un naipe cuatro veces.







de la teoría y a ocuparse de los problemas acuciantes que planteaba la física nuclear.

Este enfoque pragmático cosechó grandes éxitos. La mecánica cuántica permitió predecir la antimateria, comprender la radiactividad (y los fundamentos de la energía nuclear), dar cuenta del comportamiento de los semiconductores y explicar la superconductividad, amén de describir las interacciones entre la luz y la materia (que llevó a la invención del láser) o entre las ondas de radio y el núcleo (que condujo a la formación de imágenes por resonancia magnética nuclear). Muchos de los éxitos de la mecánica cuántica implican a su extensión, la teoría cuántica de campos, que se halla en la base de la física de las partículas elementales desde sus orígenes hasta los actuales experimentos con las oscilaciones de neutrinos y la búsqueda de la partícula Higgs y la supersimetría.

Muchos universos

A mediados del siglo pasado era evidente que los sucesivos éxitos de la mecánica cuántica no podían ser fruto de una teoría provisional e improvisada. En el ecuador de los años cincuenta, un alumno de la Universidad de Princeton, Hugh Everett III, decidió dedicar su tesis doctoral a revisar el postulado del colapso. Everett llevó las ideas cuánticas al límite al plantearse qué pasaría si la evolución temporal del universo entero fuera siempre unitaria. Después de todo, si la mecánica cuántica bastara para describir el universo, el estado actual del universo estaría representado por una función de onda (una función extraordinariamente complicada). Según el planteamiento de Everett, tal función de onda evolucionaría siempre de forma determinista, excluyendo todo desplome misterioso no unitario o la posibilidad de que Dios juegue a los dados.

En lugar de desplomarse por las mediciones, las superposiciones microscópicas se amplificarían vertiginosamente en complicadas superposiciones macroscópicas. Nuestro naipe estaría realmente en dos lugares a la vez. Además, una persona que lo contemplara entraría en una superposición de dos estados mentales distintos, cada uno de los cuales percibiría uno de los dos resultados. Si hubiéramos apostado que el naipe caería cara arriba, acabaríamos en una superposición de alegría y desengaño. Everett intuyó genialmente que los observadores de este universo cuántico, determinista pero esquizofrénico, percibirían la realidad con la que estamos familiarizados y, lo que es más importante, percibirían que el azar aparente obedece las reglas de probabilidad correctas (*véase el recuadro* "Interpretación de los muchos universos").

Al punto de vista de Everett se le conoce en la academia por formulación de estado relativo. Más famosa es su denominación popular de "interpretación de los muchos universos" de la mecánica cuántica; en efecto, en su seno cada componente de la superposición del observador percibe su propio universo. La formulación de Everett simplifica la teoría subyacente porque elimina el postulado del colapso, pero a un precio elevado: el que le lleva a la conclusión de que todas estas percepciones paralelas de la realidad son igualmente reales.

El trabajo de Everett pasó sin pena ni gloria durante cerca de veinte años. Muchos físicos seguían confiando en el advenimiento de una teoría fundamental que mostraría que el mundo es, después de todo, clásico, y que en él no caben absurdos como el de la bilocación de un objeto grande. Pero una nueva serie de experimentos dio al traste con estas esperanzas.

DECOHERENCIA: EL CUANTO SE HACE CLASICO

IDEA: La menor interacción con el ambiente hace que se disipe rápidamente el peculiar carácter cuántico de las superposiciones.

VENTAJAS: Contrastable experimentalmente. Explica por qué el mundo entorno parece "clásico" y no cuántico.

ADVERTENCIA: La decoherencia no elimina por completo la necesidad de adoptar una interpretación, ya sea la de Copenhague o la de los muchos universos.

La indeterminación de una superposición cuántica (*izquierda*) es distinta de la incertidumbre de la probabilidad clásica, como la que se da al lanzar una moneda (*derecha*). Un objeto matemático denominado matriz de densidad ilustra la distinción. La función de onda del naipe cuántico se corresponde con una matriz de densidad con cuatro máximos. Dos de estos máximos representan la probabilidad (50 %) de cada resultado, cara arriba o cara abajo. Los otros dos indican que estos dos resultados pueden, en principio, obstruirse entre sí. El estado cuántico todavía es "coherente". La matriz de densidad de un lanzamiento de moneda sólo tiene dos máximos, lo que significa, por convención, que la moneda está realmente cara arriba o cara abajo, aunque no la hayamos mirado aún.

INDETERMINACION CUANTICA

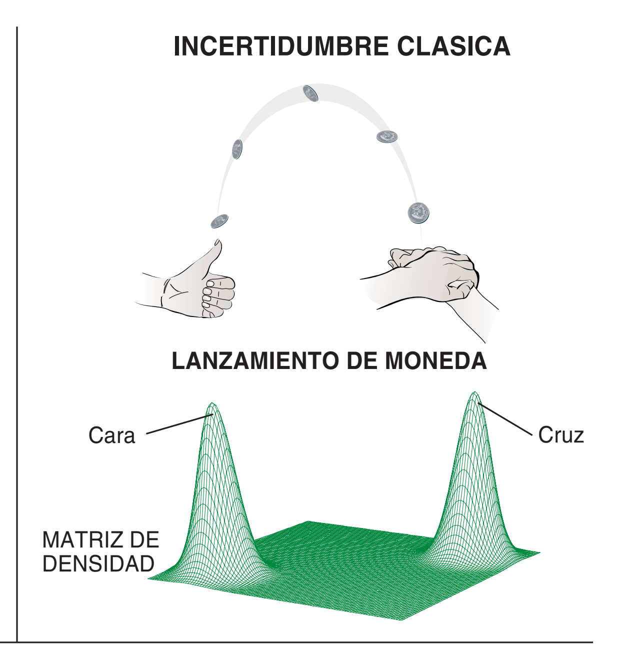
SUPERPOSICION COHERENTE

Interferencia

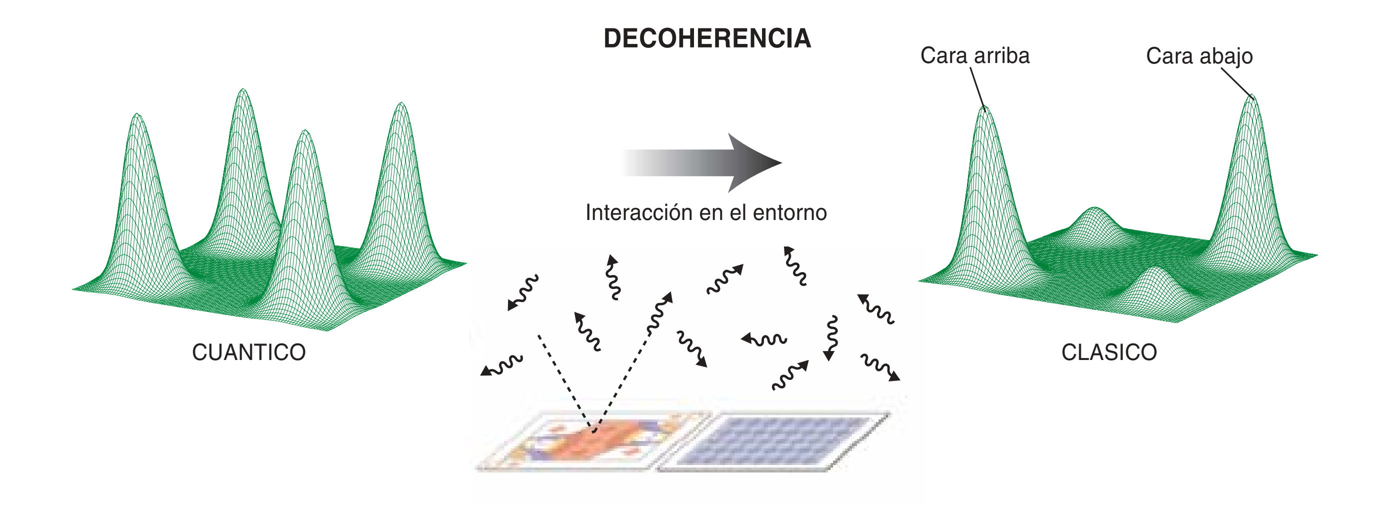
Cara arriba

Cara abajo

MATRIZ DE DENSIDAD



La teoría de la decoherencia muestra que la menor interacción con el entorno, como la colisión de un fotón o una molécula de gas, transforma rápidamente una matriz de densidad coherente en una matriz de densidad que, a todos los efectos, representa las probabilidades clásicas como las de un lanzamiento de moneda. La ecuación de Schrödinger controla el proceso entero.

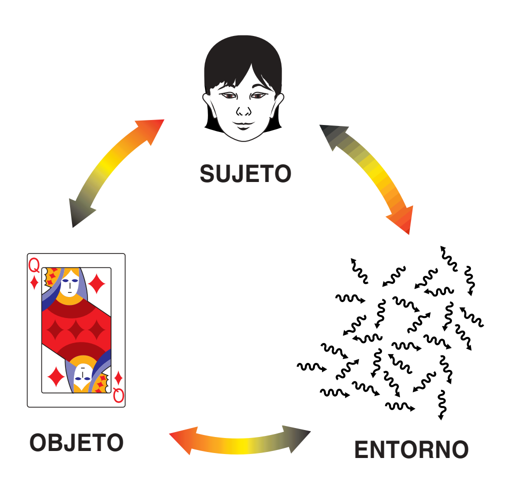


DIVIDIR LA REALIDAD

Resulta instructivo dividir el universo en tres partes: el objeto considerado, el entorno y el estado cuántico del observador, o sujeto. La ecuación de Schrödinger que rige el universo en su totalidad puede dividirse en términos que describen la dinámica interna de cada uno de los tres subsistemas y términos que exponen las interacciones entre ellos. Estos términos ejercen efectos muy distintos desde el punto de vista cualitativo.

El término que describe la dinámica del objeto suele ser el más importante; por ello, para saber qué hará el objeto, los teóricos pueden empezar ignorando el resto de los términos. En el caso de nuestro naipe cuántico, su dinámica predice que caerá a derecha e izquierda en superposición. Cuando nuestro observador mira al naipe, la interacción entre sujeto y objeto extiende la superposición a su estado mental, produciendo una superposición de alegría y tristeza por haber ganado y perdido la apuesta. Pero el observador nunca percibe esta superposición, porque la interacción entre el objeto y el entorno (que incluye el choque de las moléculas de aire o los fotones contra el naipe) conduce rápidamente a una decoherencia que hace que la superposición no pueda observarse.

Aun en el caso de que nuestro observador consiguiera aislar completamente al naipe de su entorno (por ejemplo, haciendo el experimento en una cámara oscura en el cero absoluto de temperatura) las cosas no serían muy distintas. Por lo menos una neurona del nervio óptico entraría en una superposición de activarse o no activarse cuando el observador mirara el naipe; los cálculos recientes cifran en 10^{-20} segundos el tiempo en que la decoherencia haría mella en esta superposición. A poco que los complejos procesos de excitación de las neuronas de nuestro cerebro tengan que ver con la conciencia y con la formación de nuestro pensamiento y percepciones, la decoherencia de las neuronas garantizará que nunca percibiremos una superposición cuántica de estados mentales. En esencia, nuestros cerebros relacionan inextricablemente sujeto y entorno, imponiéndonos la decoherencia.



¿No podría sustituirse la aparente aleatoriedad cuántica por algún tipo de variable desconocida propia de las partículas (las variables ocultas)? John S. Bell, físico teórico del CERN, mostró que en tal caso las magnitudes que se podían medir en ciertos experimentos de difícil realización, mostrarían una discrepancia inevitable con las predicciones estándar de la mecánica cuántica. Muchos años después, la técnica permitió ejecutar los experimentos y eliminar, así, la posibilidad de la existencia de variables ocultas.

Uno de nosotros (Wheeler) propuso en 1978 un experimento de "selección diferida" (*delayed choice*). Realizado con éxito en 1984, mostró otro aspecto cuántico de la realidad que desafía la descripción clásica: no sólo puede un fotón estar en dos lugares a la vez, sino que los experimentadores pueden escoger tras el experimento si el fotón estaba en los dos sitios o sólo en uno.

El sencillo experimento de interferencia de la doble rendija, en el que luz o electrones pasan a través de dos rendijas y producen un patrón de interferencia, y que Richard Feynman ensalzó como la madre de todos los efectos cuánticos, fue repetido con éxito con objetos cada vez mayores: átomos, pequeñas moléculas y, recientemente, buckybolas de 60 átomos. Tras este logro, el grupo de Anton Zeilinger en Viena comenzó a plantear la posibilidad de realizar el experimento con un virus. El veredicto experimental es inapelable: nos guste o no, la rareza del universo cuántico es real.

La censura cuántica: la decoherencia

Los progresos experimentales de las últimas décadas se acompañaron de notables avances en la comprensión teórica. El trabajo de Everett había dejado sin responder dos cuestiones cruciales. A tenor de la primera, si el mundo contiene realmente extrañas superposiciones macroscópicas, ¿por qué no las percibimos?

La respuesta la aportó en 1970 H. Dieter Zeh, de la Universidad de Heidelberg, en un artículo seminal. Mostraba que la propia ecuación de Schrödinger comportaba decoherencia, cierta forma de censura. Así vino en designarse tal fenómeno porque de la superposición ideal prístina se predica la coherencia. El concepto de decoherencia sería depurado por Wojciech H. Zureck, Zeh y otros en las décadas siguientes. Hallaron que las superposiciones coherentes sólo persisten mientras permanecen ocultas al resto del mundo. Nuestro naipe cuántico recibe constantemente el impacto de moléculas de aire y fotones que comprueban si ha caído hacia la derecha o hacia la izquierda, destruyendo ("decohesionando") la superposición y hurtándola a la observación (*véase el recuadro* "Decoherencia: el cuanto se hace clásico").

Es como si el entorno sustituyera al observador, provocando el hundimiento de la función de onda. Supongamos que una persona mirara al naipe sin decirnos de qué lado ha caído. Según la interpretación de Copenhague, su medida fuerza la superposición en un resultado determinado, y nuestra mejor descripción del naipe pasa de una superposición cuántica a una representación clásica de nuestra ignorancia de lo que aquella persona vio. Los cálculos de la decoherencia muestran, pues, que no es precisa la intervención de un observador humano (o el colapso explícito de la función de onda) para obtener prácticamente el mismo efecto; bastaría con una molécula de aire que rebotara en el naipe caído. A efectos prácticos, una interacción ínfima torna la superposición en una situación clásica, en un abrir y cerrar de ojos.

La decoherencia explica por qué no solemos ver las superposiciones cuánticas en el mundo que nos rodea. No se debe a que la mecánica cuántica se ciña, por principio, a ob-

jetos mayores que cierta talla mágica, sino a la cuasiimposibilidad de mantener aislados los objetos macroscópicos como los gatos o los naipes en el grado necesario para evitar la decoherencia. Los objetos microscópicos, en cambio, pueden ser aislados de su entorno para que retengan su comportamiento cuántico.

La segunda pregunta sin respuesta planteada por Everett, más sutil aunque de igual importancia, inquiría por el mecanismo que selecciona los estados clásicos (cara arriba y cara abajo, en el caso del naipe). Si los consideramos estados cuánticos abstractos, no tienen nada de particular, comparados con las innumerables superposiciones posibles de arriba y abajo en distintas proporciones. ¿Por qué respetan los muchos universos la separación estricta entre arriba y abajo con la que estamos familiarizados, y nunca otras alternativas? La decoherencia responde también a esta cuestión, ya que los cálculos muestran que los estados clásicos como arriba y abajo son precisamente los más resistentes a la decoherencia. Con otras palabras, las interacciones con el entorno no afectarían a los naipes cara arriba o cara abajo, pero harían que toda superposición de arriba y abajo desembocara en una de las dos alternativas clásicas.

La decoherencia y el cerebro

De lejos les viene a los físicos su tendencia a analizar el universo dividiéndolo en dos partes. En termodinámica, los teóricos separan un cuerpo material de todo cuanto le rodea (el "ambiente"), que proporciona las condiciones prevalentes de temperatura y presión. Tradicionalmente la física cuántica separa del aparato de medición clásico el sistema cuántico. Si se toman en serio la unitariedad y la decoherencia, resulta instructivo dividir el universo en tres partes descritas por sendos estados cuánticos: el objeto considerado, el ambiente y el observador, o sujeto (*véase el recuadro* "Dividir la realidad").

La decoherencia causada por la interacción entre el ambiente y el objeto o el sujeto es la responsable de que nunca percibamos una superposición cuántica de estados mentales. Además, nuestros cerebros están inextricablemente ligados con el ambiente, de forma que la decoherencia de las neuronas excitadas es inevitable y esencialmente instantánea. Como ha hecho notar Zeh, estas conclusiones justifican el que en los libros de texto se use el postulado del colapso de la función de onda como una receta práctica que recomienda "callar y calcular": se deben calcular las probabilidades como si la función de onda se desplomara cuando observamos el objeto. Pese a que, según Everett, la función de onda no llega nunca a hundirse, los investigadores están de acuerdo en que la decoherencia produce un efecto que tiene el mismo aspecto que un "colapso".

El descubrimiento de la decoherencia, junto con los experimentos cada vez más refinados que ponen de manifiesto las perplejidades cuánticas, no han dejado indiferentes a los físicos. La principal motivación para la introducción de la noción de colapso de la función de onda era explicar por qué los experimentos producían resultados determinados y no extrañas superposiciones de resultados. Esta motivación ha dejado de existir. Además, llama la atención que nadie haya sugerido una ecuación determinista contrastable que especifique con exactitud el momento en que se supone debe producirse el colapso.

De una encuesta informal realizada en julio de 1999 durante un congreso sobre computación cuántica en el Instituto Isaac Newton de Cambridge se desprende que la percepción de los físicos está cambiando. De los 90 físicos encuestados, sólo ocho declararon que su punto de vista implicaba el colapso explícito de la función de onda. Treinta prefirieron "muchos universos o historias consistentes (sin colapso)". (A grandes rasgos, el enfoque de historias consistentes analiza secuencias de medidas y reúne grupos de resultados alternativos que formarían una historia "consistente" para un observador.)

Pero la imagen resultante no es clara: 50 de los investigadores respondieron "ninguna de las anteriores o indeciso". Puede que la confusión lingüística reinante haya contribuido a un número tan alto. No es raro encontrar dos físicos que afirman subscribir la interpretación de Copenhague y discrepan, sin embargo, en qué entender por tal.

Dicho esto, la encuesta plantea sin ambages la necesidad de poner al día los manuales de mecánica cuántica. Aunque estos libros incluyan, sin excepción, en uno de los primeros capítulos el colapso no unitario como un postulado fundamental, la encuesta sugiere que muchos físicos (especialmente los cada vez más numerosos que se dedican a la computación cuántica) no toman este postulado en serio. La noción de colapso seguirá siendo útil como receta de cálculo, pero una advertencia adicional de que probablemente no se trata de un proceso fundamental que viola la ecuación de Schrödinger ahorraría muchas horas de confusión a los estudiantes más avispados.

Mirando al futuro

Tras 100 años de ideas cuánticas, ¿qué nos depara el futuro? ¿Qué misterios quedan por resolver? ¿Qué hemos de pensar o hacer con los cuantos? Aunque las cuestiones relacionadas con la ontología y la naturaleza última de la realidad aparecen recurrentemente en los debates sobre la interpretación de la mecánica cuántica, puede que la teoría no sea sino una de las piezas del rompecabezas. Podemos agrupar las teorías en árboles genealógicos de forma que, al menos en principio, cada una de ellas esté basada en las teorías más fundamentales que la preceden. Muy en lo alto del árbol hallamos la teoría de la relatividad general y la teoría cuántica de campos. En el siguiente nivel aparecen la relatividad especial y la mecánica cuántica, que a su vez comprenden el electromagnetismo, la mecánica clásica, la física atómica, etc. Disciplinas como la informática, la psicología o la medicina aparecen en las ramas inferiores.

Todas estas teorías tienen dos componentes: las ecuaciones matemáticas y la prosa que explican la relación entre ecuaciones y observación experimental. La mecánica cuántica enseñada en los manuales presenta ambos componentes: algunas ecuaciones y tres postulados fundamentales enunciados con palabras del lenguaje ordinario. En cada nivel de la jerarquía de teorías se introducen nuevos conceptos (por ejemplo, protones, átomos, células, organismos, culturas) porque son convenientes y porque captan la esencia de los fenómenos, sin tener que recurrir a las teorías de niveles superiores. La proporción entre ecuaciones y prosa decrece a medida que descendemos por el árbol de teorías, y aquéllas terminan por desaparecer llegados a la medicina o la sociología. Las teorías de la copa del árbol, en cambio, están fuertemente matematizadas, y los físicos siguen esforzándose por comprender los conceptos codificados en las fórmulas que utilizan.

El objetivo último de la física es dar con lo que popularmente se co-

noce como una teoría del todo, a partir de la cual se deduzca el resto. De existir una teoría así, ocuparía el lugar más alto del árbol genealógico, lo que querría decir que tanto la teoría de la relatividad general como la teoría cuántica de campos se deducirían de ella. Los físicos echamos de menos algo en lo alto del árbol, porque carecemos de una teoría consistente que incluya la gravedad y la mecánica cuántica, mientras que el universo contiene ambos fenómenos.

Una teoría del todo puede que no debiera contener ningún concepto, ya que de otro modo nos veríamos obligados a buscar una explicación para esos conceptos en términos de una teoría más fundamental, y así sucesivamente en un proceso sin fin. En otras palabras, la teoría debería ser pura matemática y no incluir explicaciones ni postulados. Un matemático infinitamente inteligente podría deducir todo el árbol genealógico de teorías a partir de las ecuaciones, e inferir así las propiedades del universo que estas ecuaciones describen, junto con las propiedades de sus habitantes y sus percepciones del mundo.

El primer siglo de mecánica cuántica nos ha regalado técnicas muy poderosas y ha contestado a muchas preguntas. Pero la física ha planteado nuevas cuestiones tan importantes como las que preocupaban a Maxwell cuando impartió su lección inaugural, cuestiones relacionadas con la gravedad cuántica y con la naturaleza última de la realidad. Si la historia nos enseña algo, la centuria que iniciamos nos deparará más de una sorpresa.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ONE HUNDRED YEARS OF QUANTUM PHYSICS. Daniel Kleppner y Roman Jackiw, en *Science*, vol. 289, págs. 893-898; 11 de agosto de 2000.

BEAM LINE. Número especial dedicado al siglo cuántico. Volumen 30, número 2 (verano/otoño 2000). Disponible en la red en www.slac.stanford.edu/pubs/beamline/pdf/00ii.pdf.

MAX PLANCK: THE RELUCTANT REVOLUTIONARY. Helge Kragh, en *Physics World*, vol. 13, n.º 12, págs. 31-35; diciembre de 2000.

THE QUANTUM CENTENNIAL. A. Zeilinger, en *Nature*, vol. 408, págs. 639-641; 7 de diciembre de 2000.

La cordillera Alfa

Con la expedición del rompehielos "Estrella Polar" pudo estudiarse una poderosa cordillera submarina que se extiende entre el polo Norte y Canadá. Se trata de la estructura más antigua del océano Artico

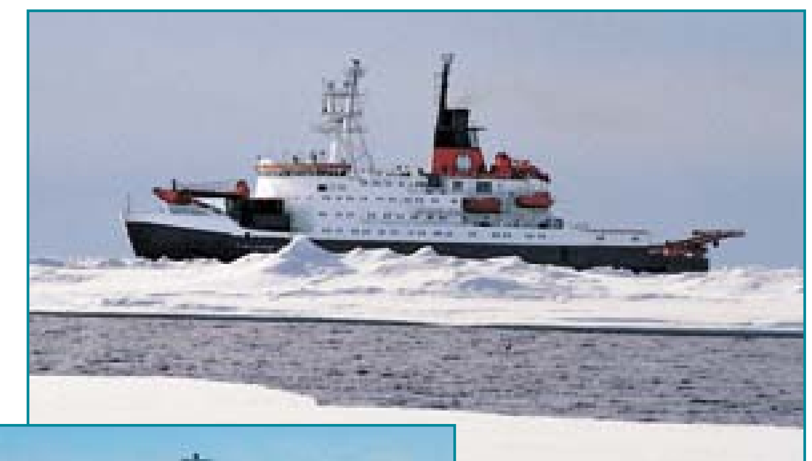
Gert Lange y Wilfried Jokat

Doscientas millas marinas más allá del polo Norte, en el fondo del océano Artico, se encuentra un sistema de montañas harto desconocido. La cordillera Alfa, así se llama, se extiende a lo largo de 1800 kilómetros y presenta picos de más de 3000 metros. Una suerte de Alpes marinos. Debe su nombre al campamento norteamericano ("Alpha Arctic") que se instaló durante el Año Polar Internacional 1957/58 sobre un témpano a la deriva situado en el extremo norte del Canadá, pues desde allí se descubrió el macizo.

Algunos submarinos navegaron después por la zona, pero sólo desde 1998 empezaron a ver la luz pública algunos resultados de sus viajes secretos. Hasta ahora ningún rompehielos se había adentrado hasta la región central de la cordillera Alfa. La expedición ARCTIC-98, en la que participamos uno como jefe de la misma y otro como periodista, permitió, por primera vez, el estudio geológico de aquellos parajes.

A principios de julio de 1998 el rompehielos oceanográfico "Estrella Polar" (*Polarstern*) puso rumbo desde el noreste de las islas Spitzbergen hacia la cordillera Alfa. Sabíamos que no se trataba de una travesía más. El riesgo era evidente. En todas direcciones hasta perderse en el horizonte aparecían enormes bloques de hielo antiguo (de notable dureza) con un espesor de cuatro a cinco metros. Ni siquiera el "Estrella Polar", el buque oceanográfico mejor pertrechado, podría surcar ese medio. Ante este panorama, el Instituto Alfred Wegener de Investigación Polar y Marina, que coordinaba la expedición desde Bremerhaven, contrató al buque más potente del mundo, el rompehielos nuclear ruso "Arktika", para que fuera abriendo el camino. De lo que nadie dudaba, sin embargo, era del éxito final. En esa esperanza coincidíamos los 51 científicos y técnicos de la misión.

Al menos mientras estábamos a la altura de las Spitzbergen. Dos semanas más tarde, las cosas empezaron a verse de otro modo. En cuanto dejamos la Tierra de Francisco José, un grupo de islas situado al noreste de las Spitzbergen, los barcos se vieron rodeados por un grueso cinturón de bloques de hielo. Pero esa contingencia estaba prevista. El "Arktika", con sus 75.000 caballos de vapor, tomaría la delantera y el "Estrella Polar", con 20.000 caballos de vapor, le secundaría a través de la vía abierta entre los hielos por el primero. Sin embargo, la presión sobre los témpanos de hielo era tan fuerte, que la capa helada a





1. A TRAVES de los hielos polares, el rompehielos ruso "Arktika" de propulsión nuclear, con una potencia de 75.000 caballos de vapor, le abre paso al "Estrella Polar". Por sus propios medios el rompehielos oceanográfico alemán, con una potencia de 20.000 caballos de vapor, no podría atravesar capas de hielo antiguo, muy compacto, de hasta cinco metros de espesor.

GERT LANGE y WILFRIED JOKAT tienen intereses muy dispares. Aquél, que ha intervenido en tres expediciones polares, se dedica a la divulgación científica. Jokat es geofísico del Instituto Alfred-Wegener de Investigación Polar y Marina de Bremerhaven. En sus trabajos sobre la evolución del Artico y del Antártico se ha servido de métodos sísmicos, magnéticos y gravimétricos.

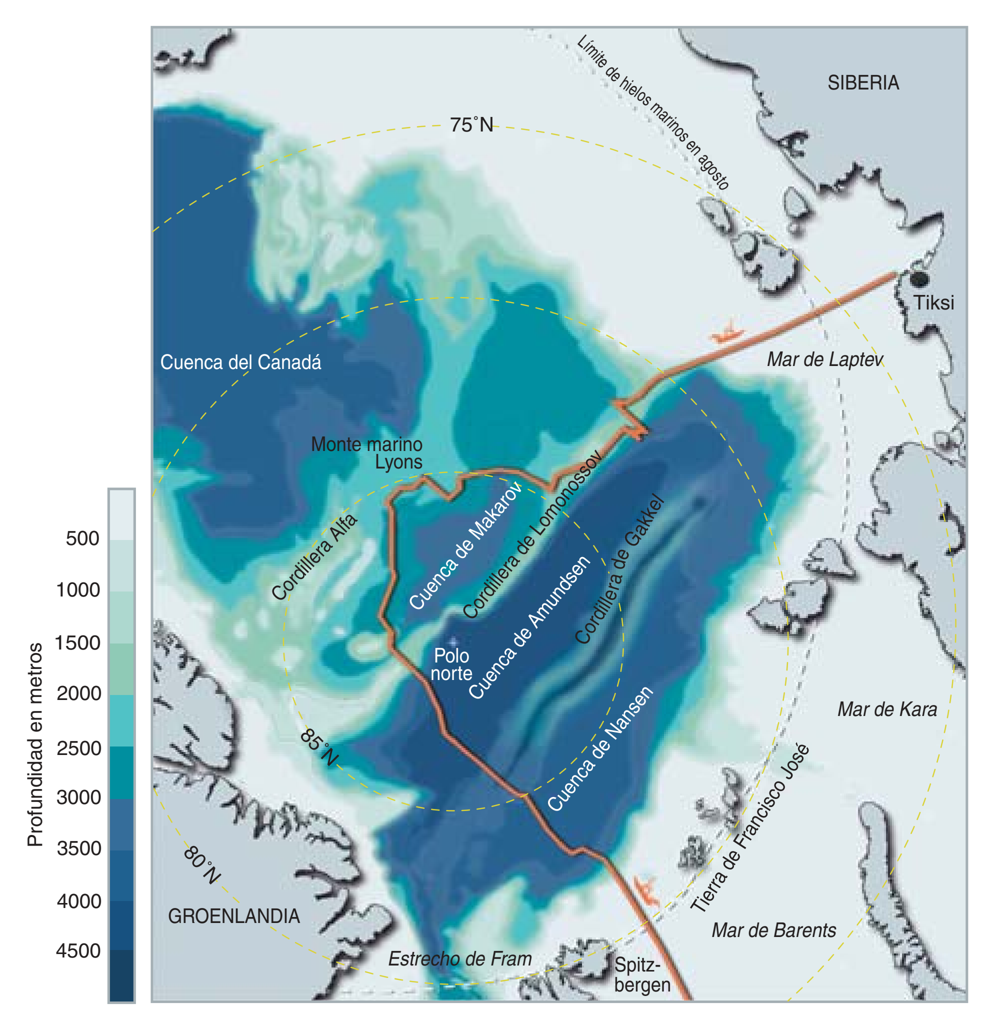
popa del "Arktika" se cerraba inmediatamente. A menudo el coloso ruso tenía que desatascar al "Estrella Polar" atrapado entre los hielos.

El 5 de julio, alrededor de las diez de la noche, hora de a bordo, se alcanzó la cota inicial para realizar la primera de las medidas sismológicas programadas, en el borde de la plataforma del mar de Barents. En la mesa de trabajo del "Estrella Polar" había mucha excitación, provocada por el grupo de técnicos, auxiliares y doctorandos, formado en casi su mitad por mujeres.

Entre los aparatos de medida destacaban los "cañones de aire", pulsadores que se deslizan por el agua desde una grúa de popa y emiten un impulso sonoro que choca contra el suelo marino. Antes se utilizaban explosivos; para evitar agresiones al entorno se han sustituido por estos sistemas de aire comprimido.

Las ondas sonoras son reflejadas o desviadas por las superficies que separan estratos rocosos de características diferentes, llegan al suelo marino y vuelven a la superficie. De la medición del tiempo que tardan en realizar ese recorrido se extrae información sobre la estructura del fondo oceánico. Con ciertas limitaciones puede incluso saberse qué estratos están formados por sedimentos arcillosos, por pizarras o por basalto.





2. RUTA DEL "ESTRELLA POLAR" en su expedición del verano de 1998. La travesía conjunta con el "Arktika" empezó al este de las islas Spitzbergen, pasó cerca del polo Norte hasta el monte submarino Lyons, una de las estribaciones occidentales de la cordillera Alfa, y terminó un mes más tarde en la ciudad siberiana de Tiksi.

Para registrar las señales de retorno se utiliza una "manguera" de plástico lleno de hidrófonos arrastrado por el buque. En mar abierto el tubo (*streamer*) alcanza varios kilómetros, pero debido al riesgo que suponían los hielos sólo utilizamos una longitud de 300 metros. Ni una hora había transcurrido cuando, con intervalos de 15 segundos, los impulsos del cañón empezaron a zumbar.

La noche siguiente el "Estrella Polar" se vio inmerso en un espeso campo de hielo. El aparato que portaba los cañones de aire quedó sobre un témpano pegado a popa. Antes de que nadie se diera cuenta de la crítica situación volvió a disparar. Si en vez de hacerlo en el agua el cañón dispara en el aire, su energía se libera con mucha más potencia y pueden resultar dañado. Después de un disparo en el aire estos aparatos se han de izar para examinarlos. Por fortuna sólo uno mostraba haber sufrido un ligero desperfecto. El control del tubo indicaba que dos de los seis segmentos no habían recogido ninguna señal: se habían perdido en el hielo.

El resto de la "manguera" había quedado como una serpiente de cascabel en un campo de ruinas ciclópeas formado por témpanos blanco-azulados. Costó seis horas izar el tubo. Para evitar posibles daños en los aparatos de medida hubo que suspender el rastreo del perfil del lecho marino.

Ya en 1991 el Instituto Alfred Wegener había intentado trazar un perfil sísmico del borde sur de la cuenca de Nansen, 90 kilómetros más al oeste. En aquella ocasión el "Estrella Polar" quedó inmovilizado casi a la misma altura que ahora. Los problemas que se presentan en esta región se deben al movimiento transpolar de los hielos. Los vientos y las corrientes marinas desplazan la mayoría de los hielos formados en el mar de Laptev, al norte de la Siberia central, hacia la zona marina situada entre Groenlandia y las Spitzbergen. Cualquier buque que navegue por el mar de Barents y se atreva a ir más allá de los 80º de latitud se encontrará con esta corriente de hielos. Por eso se disponía sólo de los datos medidos en 1991, de un breve perfil ruso de la plataforma marina del mar de Barents y, ahora, del corte que estábamos obteniendo.

¿Qué impulsa a los científicos a empecinarse en instalar sus instrumentos de medida en estos hielos? Los datos que les permitan entender la historia del desarrollo del océano Artico. Quieren saber cómo se formaron las estructuras de sus fondos, qué representan y qué relaciones tienen entre sí y con los continentes vecinos a los que en otros tiempos estaban unidas.

La parte eurasiática de la cuenca ártica está limitada, junto al polo Norte, por la cordillera marina Lomonossov, descubierta en 1948. Hay que atravesarla en nuestra ruta hacia Alfa. Tiene una altura de 3000 metros sobre la cuenca de Amundsen y cruza como un cerrojo el océano Glacial Artico. La expedición del "Estrella Polar" de 1991 reforzó la hipótesis de que la cordillera de Lomonossov se separó de la plataforma siberiana, entonces expuesta, durante la apertura de la cuenca ártica hace unos sesenta millones de años, para hundirse después bajo el nivel del mar.

Nuestro frustrado sondeo sísmico debiera haber aportado una definitiva demostración de esta hipótesis. Había programada una larga travesía desde la plataforma de Barents, pasando por la cuenca de Nansen, la cordillera de Gakkel y la cuenca de Amundsen, hasta la cordillera de Lomonossov. Los datos hablaban de una caída de las profundidades desde los 270 metros de la meseta de la plataforma de Barents hasta los 3500 metros de la cuenca de Nansen.

Entre campos de hielo y bancos de niebla

En los días siguientes el "Estrella Polar" tuvo que afrontar un duro trabajo. Por una parte había que trazar un perfil hidrológico hasta una profundidad de 4012 metros. Alrededor de los 300 metros de profundidad, el aumento de la temperatura del agua permitió reconocer la llegada de la corriente atlántica. Estel-

la Weigelt, que en su día formó parte del grupo de mujeres que invernó en la estación antártica alemana "Neumayer", volaba casi a diario en helicóptero para medir el espesor de los hielos. Iba acompañada de un ayudante y un auxiliar armado con una carabina: unas recientes huellas de oso nos merecían respeto.

Dejamos el polo Norte a nuestra derecha, a una distancia de 150 kilómetros. A nadie pareció importarle ese mágico punto. Nuestra meta era la cordillera Alfa que está detrás, en el Artico canadiense. ¿Qué se sabe de esta cadena montañosa submarina? Muy poco, si algo. ¿Constituye un fragmento del continente que hace millones de años se desprendió tal vez de Groenlandia o de Alaska y quedó sumergido en el océano? ¿Se trata de una vieja cordillera oceánica o de una formación volcánica reciente? En todo caso, el conocimiento de la cadena de montañas resulta imprescindible para desentrañar la formación del océano Glacial Artico.

Mañana de 11 de julio. Apenas si nos hemos movido del lugar donde estábamos la tarde anterior. El trazado del perfil sísmico del espolón de Marvin, una estructura poderosa que sobresale entre las cordilleras Alfa y Lomonossov, hubo de interrumpirse debido a una fuerte corriente de hielos. El buque sufría sacudidas y vibraciones cuando la proa chocaba contra el hielo o un fragmento duro como la piedra se empotraba en la hélice. El "Estrella Polar" se deslizaba a lo largo de un témpano y se inclinaba a un lado. Sería demasiado decir que íbamos a paso de tortuga. En las últimas ocho horas habíamos avanzado doce millas marinas, es decir 22 kilómetros. Pero lo peor estaba por llegar.

Alrededor del mediodía nos rodeó una densa niebla. Nos habíamos acostumbrado a la bruma omnipresente, pero ahora estábamos sumergidos en una oscuridad blanca. No veíamos el "Arktika" que nos guiaba. En aquel entorno fantasmal, nuestro buque se inmovilizó.

Atrapados por el hielo, nos habíamos detenido a 87º 42' de latitud norte y a 108º 48' de longitud oeste. Pero no estábamos quietos. Todo el gigantesco y compacto témpano de hielo en el que estábamos empotrados se deslizaba o giraba sobre sí mismo. Se decidió colocar algunos aparatos en un agujero del hielo de popa. De acuerdo con lo captado por la cámara nos deslizábamos sobre el fondo marino. Eran las primeras imágenes de esta parte del planeta tomadas en vídeo. Se reconocía un suelo arenoso sin apenas señales de vida.

Pausa involuntaria

El paro relativo tuvo una ventaja: el batímetro, cuya misión es medir y dibujar las inclinaciones y desniveles del fondo marino, tenía constantes problemas con los fragmentos de hielo situados bajo los sensores sonoros. En aquellas circunstancias los datos que podían obtener eran extraordinarios. El barco se deslizaba tranquilamente, ojo avizor, sobre el suelo del mar, pero no lo hacía en la dirección que hubiéramos deseado.

Ernst-Peter Greve, capitán del oceanográfico, y Alexander Barinov, capitán del rompehielos ruso, decidieron que el "Arktika" avanzaría tres millas y luego volvería para proseguir de nuevo el "Estrella Polar". Pero también el "Arktika" quedó atrapado. La maniobra de giro en una cerrada capa de hielo podía durar siglos. El balance de los últimos días fue frustrante: del 10 al 11 de julio, siempre a las 12 horas, se consiguió una velocidad de 6,5 nudos y del 11 al 12 sólo 6,2 nudos, lo que significa recorrer algo más de once kilómetros en 24 horas.

Debatimos las posibilidades que todavía teníamos de poder cumplir nuestro objetivo original: la región oriental de la cordillera Alfa. De acuerdo con las informaciones ofrecidas por el helicóptero, semejante propósito resultaba inalcanzable. La dirección de la expedición resolvió en consecuencia dirigirse exclusivamente a las estribaciones occidentales de la cordillera, el monte marino Lyons. Allí debería haber menos hielo, aunque



3. EL CABALLETE con los "pulsadores de aire" que proporcionan las ondas sonoras para los sondeos sísmicos es sumergido en el agua desde la popa del "Estrella Polar" (*arriba*). Posteriormente se suelta la manguera con los hidrófonos para el registro de las ondas reflejadas en los límites entre estratos de diferente composición, en el fondo marino.

la travesía procedía con dificultades. Los témpanos tenían un espesor medio aproximado de sólo tres metros, pero al chocar entre sí producían gigantescas olas de seis a ocho metros de altura.

Cuando llegamos a la ladera de la cordillera el equipo encargado de las mediciones sismográficas volvió a preparar el tubo con los hidrófonos. Sólo cinco minutos después de iniciar un control, el caballete donde estaba situado el cañón de aire fue a parar al hielo y se desequilibró. Hartmut Martens se abalanzó sobre el compresor y pudo desconectar el gas justo antes del siguiente disparo. Se habían roto las dos cuerdas utilizadas para sujetar el dispositivo; los valiosos aparatos quedaron colgados del cable y de la cuerda del caballete. Por fortuna pudieron salvarse.



4. MEDIANTE UNA SONDA con mecanismo para toma de materiales los geólogos han obtenido un segmento en forma de paralelepípedo del fondo marino. Ahora estudian esta muestra en el laboratorio del "Estrella Polar" buscando la presencia de seres vivos.

Un desierto biológico en el fondo marino

A la noche siguiente los motores se pararon. De nuevo, encajados entre hielos. El "Estrella Polar" permanecía quieto sobre las pendientes de la cordillera Alfa. Hasta el mediodía no empezó a desembarazarse. A popa se había formado una pequeña zona de agua sin hielo. Por fin los biólogos podían lanzar sus sondas para obtener una muestra rectangular del fondo marino sin alterar su consistencia interna. Ante los fracasos de una expedición polar Eike Rachor, especialista en fauna del fondo marino, solía reaccionar con humor y con una cierta suficiencia justificada por su edad. Sin embargo, en esta ocasión no podía ocultar su inquietud. Nadie había estudiado hasta entonces la fauna abisal de esta zona.

En el punto donde nos encontrábamos, la profundidad era de 2900 metros. Izada la sonda, se produjo la decepción. En el cieno había un par de conchas de molusco transportadas por el hielo desde aguas marinas más superficiales. Además podían reconocerse un estatolito (huesecillo del aparato vestibular del pez que contribuye a mantener el equilibrio) y las huellas de un gusano. Rachor no esperaba encontrar muchos organismos en la cordillera Alfa. Pero tampoco tamaña escasez. El fondo marino era allí un desierto.

En la cordillera Alfa no hay ni equinodermos, ni moluscos. Pero sí aparecían en todas las muestras gusanos de arena tal y como los conocemos en las aguas someras, aunque mucho menores. El animal mayor era una rosa de mar que, desplegada, medía dos centímetros de longitud.

Mayor fortuna tuvieron los investigadores del plancton. En sus redes se encontraron incluso algunas medusas procedentes de las capas más profundas. Y abundaba el krill, fuente nutricia de peces y ballenas. Con sus largas antenas rojas y llamativos glóbulos oculares de color naranja cuando esperan descendencia, esos crustáceos son el centro de atención de los biólogos marinos. Expertos en supervivencia medran incluso en el desierto biológico de la cordillera Alfa, aunque una barrera de hielo de ocho a diez años de antigüedad les separe del aire y de la luz. La materia orgánica transportada por las corrientes les sirven de alimento.

El monte submarino Lyons se yergue unos 2500 metros, en la vecina cuenca Makarov. Cuando llegamos allí reinaba la calma. El hielo apenas se movía. Pudimos captar dos extensos perfiles relacionados entre sí: uno de unos 190 kilómetros de longitud siguiendo el eje de la cordillera Alfa y otro de 80 kilómetros perpendicular al primero. Se lograba, por primera vez, un esbozo detallado de la estructura de esta cadena montañosa. El espesor de la capa de sedimentos oscilaba entre los 600 y los 1200 metros.

Entre la cordillera central y el monte Lyons se abre un surco de unos 800 metros y muy agreste superficie. Es evidente que una fuerte corriente marina impide aquí el depósito de sedimentos ligeros. Por otra parte, debe tratarse de un paso importante de acceso a las masas de agua árticas. Por la ladera ascendente se espesa la topografía; debido a la baja velocidad de la corriente, parecen haberse depositado sedimentos finos, como ocurre en la orilla inte-



5. LA SONDA PARA EL ESTUDIO del perfil hidrológico, izada. Esta sonda registra la temperatura y conductividad eléctrica del agua marina en función de la profundidad. Los recipientes con aspecto de botellas de gas contienen muestras de agua de distintas profundidades.

6. CUANDO LAS CONDICIONES meteorológicas lo permiten los científicos se desplazan en helicóptero para medir la profundidad del hielo a lo largo de la ruta prevista. El tubo blanco de la fotografía es la sonda para medir la conductividad eléctrica a poca profundidad, que depende de la cantidad de hielo. Una estación radioeléctrica automática que simultáneamente se pone en funcionamiento (el cono que se ve al fondo) proporciona a lo largo de varios años información sobre la deriva del témpano de hielo en que se encuentra.



rior de los meandros fluviales. En las estructuras estratificadas se distinguen zonas alteradas; la cadena montañosa se extiende lenta, sin haber alcanzado todavía el estado de reposo.

Las señales obtenidas por reflexión sísmica aportan información sobre la sucesión de los estratos geológicos, pero no nos descubren sus propiedades físicas. Ahora bien, el conocimiento de estas estructuras resulta imprescindible para contestar a la pregunta fundamental sobre la procedencia de la cordillera Alfa: ¿procede del océano o del continente? En este sentido el estudio de la refracción sísmica sí que ofrece información. Este método se basa en la medición del tiempo empleado por las ondas desviadas por los diferentes estratos. El ángulo de desviación depende de la diferencia de velocidades de las ondas sísmicas en dos estratos vecinos; a su vez, esta diferencia de velocidades traduce una diferencia de densidades.

Para las medidas por sismografía de refracción se necesita una mayor distancia entre la fuente sonora y los aparatos receptores. Por esta razón se colocan boyas sónicas adicionales a determinadas distancias. Las boyas captan ondas desviadas por separaciones de estratos situadas a una distancia de hasta 25 kilómetros. Los registros señalan el paso del material de sedimento a la base rocosa (basamento) del monte Lyons. En ese lugar se observa un cambio brusco de velocidad de propagación de las ondas sonoras, pasando de 2,5 a 4,5 kilómetros por segundo. Al aumentar la profundidad, crece paulatinamente la velocidad sísmica hasta los 5,7 kilómetros por segundo.

Disponiendo de esa información, empezamos a conocer la naturaleza de la cordillera. La pauta seguida por las velocidades y los datos recabados por sismografía de reflexión respaldan la tesis de que sus estructuras coinciden con las de la corteza oceánica. Pierde peso, en consecuencia, la teoría según la cual la cordillera Alfa sería un fragmento de la plataforma separado y desplazado por las corrientes. Según todas las apariencias la cordillera tiene un origen oceánico. Evidentemente, la demostración definitiva no se conseguirá hasta que se examine roca procedente de la base de la cordillera, pero esto se halla todavía lejos de nuestro alcance.

A pesar de que, debido a las adversas condiciones del hielo, no pudimos trazar el perfil transversal completo de la meseta de la cuenca de Makarov, recabamos datos de notable interés para la investigación geológica ulterior. El registro sismográfico revela un brusco desnivel, pasando de los 2100 a los 2900 metros de profundidad. Del estudio de los patrones de reflexión de las ondas sonoras se deduce que esta sima podría estar recubierta por una serie ininterrumpida de sedimentos antiguos compactos. Las muestras extraídas de estos estratos podrían a buen seguro documentar la historia climática del Artico desde la formación de la cordillera Alfa.

En busca de testimonios climáticos

Desde hace tiempo los geólogos buscan un archivo climático de ese tipo. De acuerdo con simulaciones de ordenador, es en los polos donde se reflejan con mayor nitidez los cambios de la temperatura media global. En los sedimentos polares se han mantenido, bastante inalterados, testimonios de las condiciones ambientales de otros tiempos.

En el Artico no reinó siempre la actual temperatura glacial. Lo prueba, por ejemplo, el hallazgo en el Artico canadiense de un esqueleto de champsosaurio de unos 90 millones de años de antigüedad. Estos reptiles, semejantes a cocodrilos, necesitan para subsistir una temperatura media anual superior a los diez grados Celsius.

Qué cambios climáticos han sucedido, cómo, cuándo y por qué se produjeron y qué repercusiones biológicas han tenido en el océano Artico y en todo el hemisferio norte eran hechos bastante bien conocidos, por lo que respecta a los últimos 100.000, a lo sumo 200.000 años, a partir de los datos obtenidos de perforaciones practicadas en la capa de hielo de la Groenlandia central. Carecíamos de información relativa a épocas anteriores. Ahora, en la pendiente que estudiábamos, nos encontrábamos representada, escrita como en un libro, la historia climática de los últimos 100 millones de años.

Para interpretar ese libro Rüdiger Stein y su grupo tenían que hacerse con muestras del núcleo central del sedimento. Se emplearon sondas que se hundían hasta el suelo marino y luego se izaban a la superficie. A tales perforadoras se les había añadido en la parte superior un peso y en la inferior un dispositivo para cerrar el material obtenido. La antigüedad de los sedimentos del monte Lyons no

se remontaba más allá de los tres millones de años; en parte sólo llegaban al Plioceno superior, que concluyó hace 1,6 millones de años.

Con la esperanza de encontrar sedimentos más antiguos, en un lugar más alto de la pendiente, viró el buque. Stein no apartaba los ojos de los aparatos de medida de la profundidad. En un lugar que se consideró apropiado se lanzó de nuevo la sonda. Se izó y se vio que en el fondo de la muestra había basalto.

¿Habíamos alcanzado el basamento de la cordillera Alfa? ¿Procedía el basalto de un cúmulo de guijarros? Para resolver el dilema necesitábamos más sondeos. Tras un intento fallido, se obtuvo una muestra cuya parte inferior estaba formada completamente por basalto disgregado.

El análisis petrológico del basalto le atribuyó una antigüedad de más de 100 millones de años. Hasta entonces se le suponía a la cordillera Alfa una edad de entre 60 y 80 millones de años. Tras ese estudio, se nos ofrece como la estructura oceánica más antigua de la cuenca ártica. La cadena podría reflejar un punto caliente, una corriente ascendente caliente en forma de hongo procedente del manto terrestre que se ha abierto paso en la corteza. Tal vez ese mismo vulcanismo determinara la apertura de la cuenca ártica.

Pero hay una dificultad. Los sedimentos encontrados se remontan a más de tres millones de años. Es decir, queda un enorme vacío de depósitos hasta los 100 millones de años de antigüedad del basalto. De cualquier forma estamos ante la más prolongada documentación continuada de los cambios climáticos experimentados en el Artico.

La expedición había llegado ya a su punto culminante. Debíamos ahora tomar rumbo al mar de Laptev para llegar a la ciudad siberiana de Tiksi. Por experiencia, y también por las imágenes que proporcionaban los satélites, los capitanes sabían que la ruta directa no era la más fácil. Era mejor seguir la cordillera de Lomonossov, porque allí el hielo se halla a menor presión. Ruta óptima para los geofísicos, que así podían abordar el estudio sismológico de la parte oriental de esta cordillera. Otra primicia.

Sorpresas en la cordillera de Lomonossov

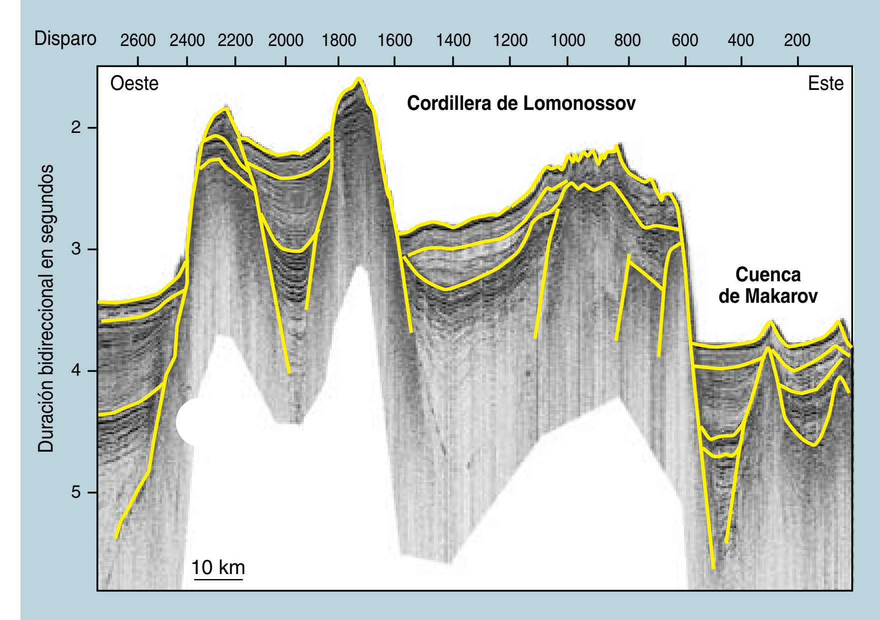
Atravesamos de nuevo la cuenca de Makarow entre las cordilleras Alfa y Lomonossov. Volvieron los encajonamientos entre los hielos mientras el "Arktika" buscaba una ruta favorable. Tras dos intentos fallidos, pudo acometerse el estudio sísmico del perfil a través de la cuenca de Makarow en un punto muy cercano a la cordillera de Lomonossov. Nos deparaba otra maravillosa sorpresa.

Durante la expedición polar del "Estrella Polar" en 1991 el accidente orográfico se describió como un altiplano de unos cien kilómetros de anchura. Desde un principio nos llamó la atención que la ruptura de esta rebanada de corteza que se extendía a lo largo de 1700 kilómetros, perteneciente a la plataforma de los mares de Barents y Kara, no dejara alguna huella en la topografía.

Por su parte, la expedición de 1991 había hallado también un gran estrato de sedimentos de unos 500 metros cuya antigüedad no parecía superar los 50 millones de años. Estos sedimentos jóvenes cubrían casi uniformemente toda la meseta. Debajo, la velocidad sónica salta de los 2,2 a los 4,5 kilómetros por segundo, lo que revela que a esa profundidad se encuentra un material que forma parte del basamento de la cordillera o ha ido engrosándose por acumulación de desprendimientos. Ante tales hallazgos, los científicos llegaron en 1991 a la conclusión de que en alguna época existió allí un horizonte erosivo, muy compacto bajo las aguas. No se trataba de sedimentos acarreados, sino de la demolición y allanamiento de la propia cordillera. Tras la ruptura, la plataforma se hundió poco a poco en las profundidades marinas.

A nosotros nos interesaba averiguar si la cordillera de Lomonossov, en su estribación hacia la Siberia oriental, presentaba también la misma naturaleza, continuándose allí el horizonte erosivo. En breve: ¿compartían

Huellas de las fuerzas tectónicas



Este perfil sísmico de unos 150 kilómetros de longitud a través de la cordillera de Lomonossov a 85º de latitud norte muestra las frecuentes fracturas de la cadena montañosa. Revela una fuerte actividad tectónica de la corteza terrestre cuando se abrió el océano Glacial Artico hace unos 60 millones de años. A partir de los tiempos empleados por las ondas sonoras en su camino de ida y vuelta entre el barco y los límites entre diferentes estratos, y de las mediciones exactas de la velocidad del sonido, puede calcularse la profundidad de los sedimentos. Las líneas amarillas indican, en una interpretación provisional, subsuelos con notable reflexividad sísmica. La superior corresponde al fondo marino. En las estructuras de las cuencas entre cimas se reconocen potentes estratos sedimentarios de unos dos (disparo 1400) y tres (disparo 2000) kilómetros. Las líneas casi verticales representan dislocaciones.

7. CON EL COLADOR PARA PLANCTON profundo se consiguió atrapar algunas medusas y cangrejos con patas de remo. La sonda que se ve en primer plano se utiliza para obtener núcleos sedimentarios del fondo marino.



ambos extremos de la cordillera, el oriental y el occidental, idéntica historia geológica?

Los sondeos aportaron unos resultados inesperados, lo que indujo a cuestionar el correcto funcionamiento del sonar. Cierto es, además, que los mapas del océano Artico pecan de inexactitudes; en los espacios situados entre los pocos puntos de medida de que se dispone los cartógrafos extrapolan datos salpicados de fantasía. Todavía en el atlas del *Time* actualizado de 1994 aparecen dibujados cuencas y cañones que no existen en absoluto. Ni tan siquiera de los mejores mapas, que son los del Laboratorio Naval de Washington, nos podemos fiar del todo: con frecuencia la profundidad marina aumenta de repente allí donde los mapas dicen que disminuye o viceversa.

Navegamos manteniendo una distancia constante del polo Norte, a unos 84º 30' de latitud norte, sobre la cordillera. Esto supone unos 300 kilómetros al sur del perfil que midió el "Estrella Polar" en 1991. Aquí asciende la ladera unos 25 kilómetros antes de lo que cabría esperar. Sorprende un talud extraordinariamente vertical. Es un ejemplo de libro de traslocación escalonada, en la que un grupo de estratos —debido, por ejemplo, a un terremoto— se derrumba a lo largo de una superficie vertical de ruptura. Las crestas aparecen muy arrugadas. A sólo 50 kilómetros el suelo se hunde en una cuenca llena de sedimentos.

Una agreste cordillera en las profundidades marinas

Cuando creíamos haber atravesado la cordillera, nos encontramos de repente un segundo pico de una altura incluso superior al primero, situado a casi 1200 metros bajo la superficie marina. En los mapas actuales aparecen profundidades de 1500 metros con un suelo oceánico liso. Nosotros observamos, por contra, estructuras montañosas regulares cuyas estribaciones meridionales se dividen en dos crestas. Nadie había contado con una topografía tan agreste. No existe el supuesto altiplano.

El estado de la cuestión había, pues, dado un vuelco espectacular. La cordillera Lomonossov es una formación bastante regular, fruto a buen seguro de una ruptura de la plataforma de Barents. Como demuestran los datos de sismografía de refracción, se halla profundamente hendida. La imagen adquiere mayor viveza si se hace abstracción de los sedimentos del valle situado entre las cumbres más elevadas, de tres a cuatro kilómetros de altura, y de los de la depresión de dos kilómetros de profundidad situada entre las dos lomas.

A medida que nos aproximábamos a la plataforma siberiana, el hielo se hacía menos compacto. Podíamos recuperar el tiempo perdido e incluso trazar aún un perfil transversal. Valía la pena averiguar si la bifurcación de la cresta continuaba en dirección a Siberia y si también allí había una superficie de erosión bajo el sedimento reciente. Ambas cosas se daban. Aunque peor conformado que en la parte central de la cordillera de Lomonossov, el horizonte erosivo se presentaba a unos 500 metros de profundidad; las ondas sísmicas pasaron de 1,9 a 4,8 kilómetros por segundo.

Se admite que la cordillera de Lomonossov está formada por antiguos sedimentos compactos de origen continental. El hundimiento de su parte oriental difiere del característico de sus partes occidental y septentrional. Probablemente esta zona ya se había bifurcado al inicio de la apertura de la cuenca ártica, cuando se hallaba unida a la plataforma siberiana. Más tarde, al engendrarse el océano Glacial Artico y extenderse el suelo marino, esa parte de la cordillera permaneció algunos millones de años apenas sumergida bajo la superficie de las aguas. Sólo al desplazarse hacia el norte se hundió definitivamente. Las dos estructuras más elevadas debieron permanecer mucho tiempo emergidas. En el océano Artico hubo,



durante largo tiempo, dos islas o cadenas de islas.

Cuando el "Estrella Polar" recaló en Tiksi, los miembros de la expedición recapitularon satisfechos. El origen de la cordillera Alfa podía datarse con bastante precisión y se disponía de datos que permitían determinar cómo surgió la cordillera de Lomonossov. Los núcleos sedimentarios con una antigüedad de hasta tres millones de años prometían arrojar luz sobre la historia del clima en el polo Norte.

Mientras proseguimos elaborando los datos recogidos, se prepara un programa de sondeos profundos previsto para el año 2003 en el marco del Programa del Sondeo Oceánico, centrado en la información sobre el clima ártico de épocas pasadas archivada en sedimentos marinos de la cordillera de Lomonossov.

Vendedores, políticos y familiares persiguen que aceptemos lo que nos piden. La psicología social ha identificado los principios básicos que nos mueven a ceder

Psicología de la 

Robert B. Cialdini

Hola,

Espero que haya disfrutado con los artículos precedentes de la revista. Ahora quiero informarle sobre algo de gran importancia personal para usted. ¿Se ha sentido engañado alguna vez para decir que sí? ¿Obligado a comprar algo que en realidad no le apetecía o a colaborar con alguna causa de fundamento sospechoso? ¿No ha deseado nunca entender por qué actuó de esa manera, para así poder hacer frente a semejantes trucos en el futuro?

¿Sí? Entonces este artículo es el apropiado. Contiene información valiosa sobre las presiones psicológicas más poderosas que le inducen aceptar las peticiones. Y está lleno de NUEVAS y PROFUNDAS investigaciones que describen exactamente cómo y por qué funcionan esas técnicas. Así que, sin más tardanza, prepárese y reciba la información que está esperando.

El estudio científico del proceso de la influencia social se inició hace más de medio siglo, exactamente en la Segunda Guerra Mundial, con los programas de propaganda, información pública y persuasión. Desde entonces, psicólogos y sociólogos han investigado la manera en que un individuo puede influir en las inclinaciones y acciones de otro. Durante los últimos treinta años he participado en esa labor, centrándome en los factores más importantes que determinan un cambio específico de la conducta: la avenencia a una petición. Seis son los condicionantes básicos del comportamiento humano a la hora de generar una respuesta positiva: reciprocidad, coherencia, validación social, agrado, autoridad y escasez. Estos factores modifican nuestras relaciones profesionales, personales y sociales, por lo que el conocimiento de las reglas de persuasión puede considerarse una verdadera fuente de poder.

Reciprocidad

Cuando la organización norteamericana de Excombatientes Mutilados envía por correo sus solicitudes para recaudar fondos, el llamamiento suele tener éxito apenas el 18 por ciento de las veces. Pero cuando el envío incluye de forma gratuita un juego de etiquetas domiciliarias, personalizadas, la tasa de éxito casi se dobla hasta llegar a un 35 por ciento. Para entender el efecto de un regalo inesperado, debemos reconocer el alcance y el poder de una regla esencial de la conducta humana: el código de la reciprocidad.

Es probable que la evolución, por efecto de la presión de selección, haya condicionado el comportamiento de los animales sociales, como nosotros. Esto explicaría que la norma que obliga a los individuos a devolver en especie lo que han recibido impere en todas las sociedades. El inesperado y tal vez ni deseado regalo del grupo de Excombatientes convenció a un número



significativo de donantes potenciales a devolver el favor, cabe pensar que, en parte, por efecto del código de reciprocidad.

Las organizaciones benéficas no son las únicas que utilizan esta estrategia. En las tiendas de comestibles se ofrecen a menudo degustaciones gratuitas; las empresas de desratización regalan inspecciones y los gimnasios, sesiones de prueba. Los clientes pueden acceder a esos productos y servicios, pero a la vez quedan en deuda. Los consumidores no son los únicos a quienes tienta la reciprocidad. Los laboratorios farmacéuticos invierten al año millones de dólares en apoyar a investigadores y en hacer regalos personales a médicos, actividades que pueden influir sutilmente en los descubrimientos de los primeros y en las recomendaciones de los últimos. Según un estudio publicado en 1998 en el *New England Journal of Medicine*, el 37 por ciento de los investigadores que publicaron conclusiones críticas acerca de la seguridad de una familia de fármacos (los bloqueantes de los canales del calcio) había recibido previamente el apoyo de compañías farmacéuticas. Entre los investigadores que defendían la seguridad de estos medicamentos, el porcentaje de los beneficiarios de viajes pagados, fondos para la investigación o incluso de un empleo, se disparó al 100 por cien.

La reciprocidad abarca algo más que regalos y favores. Aparece también en las concesiones entre personas. Supongamos que alguien nos niega un gran favor que le solicitamos. Podemos hacer una concesión por nuestra parte al renunciar a él y sustituirlo por un favor de menor entidad. Es muy probable que la reciprocidad empuje al otro a hacer una concesión por su parte y acceda a nuestro pequeño favor. A mediados de los setenta nuestro grupo realizó un experimento que ilustraba con claridad la dinámica de la concesión recíproca. Escogimos un grupo aleatorio de peatones en la vía pública a los que pedimos que acompañaran un día, de forma voluntaria, a internos de un reformatorio de excursión al zoo. Tal como se esperaba, muy pocos aceptaron, sólo un 17 por ciento.

A otro grupo aleatorio de peatones, en cambio, empezamos por pedirles que se prestaran a trabajar como asesores no remunerados en dicho centro dos horas a la semana durante dos años. Todos los integrantes de este segundo grupo rechazaron tan onerosa petición. En ese momento les hicimos una concesión. "Si no puede hacer esto", les preguntamos, "¿podría acompañar un día a un grupo de internos de excursión al zoo?" Nuestra concesión estimuló con suma eficacia la recíproca. En comparación con la simple petición de la excursión al zoo, la tasa de avenencia casi se triplicó, hasta el 50 por ciento.

1. LAS MUESTRAS GRATUITAS llevan consigo un sutil mensaje: desde un punto de vista psicológico comprometen al cliente a actuar de forma recíproca. Aquí los compradores degustan un nuevo producto, la salsa de tomate verde. Las muestras empujan a los consumidores a devolver el favor con una compra. Además, el novedoso color puede inducir a pensar que el producto es escaso, un atributo que lo hace atractivo.

Coherencia

En 1998, Gordon Sinclair, propietario de un conocido restaurante de Chicago, se debatía contra un problema diario. Con excesiva frecuencia los clientes reservaban mesa, para luego, y sin previo aviso, no aparecer. Sinclair lo resolvió indicando a la telefonista que alterara sutilmente, en apenas dos palabras, sus conversaciones con los clientes. La proporción de quienes reservaban para luego no presentarse pasó de inmediato del 30 al 10 por ciento, al convocar el cambio una potente motivación humana: el deseo de ser y parecer coherente.

La telefonista simplemente modificó su ruego "Por favor, avísenos si va a cambiar sus planes" por "¿Podría, por favor, avisarnos si cambia de planes?" Llegado este punto, hacía una pausa educada para esperar respuesta. La espera era esencial, porque inducía a los clientes a rellenar el silencio con un compromiso público. Y los compromisos públicos, incluso los aparentemente menores, orientan las acciones futuras.

Análogamente, el equipo de Joseph Schwarzwald, de la Universidad Bar-Ilan en Israel, consiguió duplicar las donaciones para discapacitados en determinadas comunidades. El factor clave: dos semanas antes de solicitar las contribuciones, lograron que los vecinos firmaran una petición de apoyo a los discapacitados, es decir, se comprometieran públicamente con esa causa.

Validación social

En una invernal mañana de finales de los sesenta, un hombre se detuvo en una acera en medio del ajetreo neoyorquino y, durante 60 segundos, levantó su mirada hacia el cielo, sin mirar a nada en concreto. Se trataba del experimento de los psicólogos Stanley Milgram, Leonard Bickman y Lawrenz Berkowitz, de la Universidad Municipal de Nueva York, diseñado para estudiar el efecto ejercido por esa acción sobre los peatones. Un 4 por ciento se unió al hombre que miraba al cielo, pero la mayoría simplemente se desvió o pasó de largo. El experimento se repetiría luego con ligeras modificaciones, con las que un gran número de peatones fue inducido a detenerse y a mirar hacia arriba.

Y todo ello gracias al fenómeno de la validación social, por el cual antes de decidir qué hacer en una situación, observamos lo que otros hacen o han hecho. Si son muchos los individuos que se han decidido por una determinada actuación, estamos más inclinados a adoptarla, porque percibimos esa idea más correcta, más válida.

Al colocar cinco hombres mirando el cielo, no uno solo, Milgram, Bickman y Berkowitz introdujeron la influencia de la validación social en su experimento callejero. El porcentaje de neoyorquinos que se les agregó fue del 18 por ciento, más del cuádruple del anterior. A mayores grupos iniciales, mayor respuesta: un grupo inicial de 15 personas consiguió que el 40 por ciento de los transeúntes se le uniera, hasta casi detener el tráfico durante un minuto.

Utilizando la validación social, se puede estimular nuestra avenencia demostrando (o simplemente insinuando) que otros ya han aceptado. Un estudio reveló que un recaudador de fondos que mostraba a los propietarios de una comunidad una lista de los que ya habían hecho una donación para un acto de beneficencia vecinal, aumentaba significativamente la frecuencia de las contribuciones. Y cuanto más larga era la lista, mayor era el efecto. Por eso, los comerciantes se desviven por informarnos de que su producto es el más vendido o el que está ganando más aceptación. Los anuncios televisivos muestran con regularidad hordas de compradores precipitándose a las tiendas para adquirir el producto anunciado.

Menos obvias, sin embargo, resultan las circunstancias bajo las cuales la validación social puede producir el efecto contrario del que se persigue. Un ejemplo lo constituye la comprensible, aunque mal orientada, tendencia de los educadores sanitarios a llamar la atención sobre un problema lamentando su excesiva frecuencia. Las campañas informativas recalcan que el uso de alcohol y drogas es elevado, que las tasas de suicidios entre adolescentes son alarmantes y que quienes contaminan degradan el medio. A pesar de que las protestas son tan ciertas cuan bienintencionadas, los creadores de estas campañas han olvidado algo básico sobre el proceso de avenencia. Bajo la aseveración "Mira cuánta gente está haciendo algo tan *indeseable*" se esconde el poderoso y devastador mensaje "Mira cuánta gente *está* haciendo algo tan indeseable".

Producto Interior Bruto

Los españoles produciremos este año más residuos que nunca. Si usted no cuida nuestros montes, ríos y playas, ¿quién lo hará?

Sea responsable. No contamine.

2. LA VALIDACION SOCIAL se sirve de la presión del comportamiento de los demás a la hora de decidir la conducta individual. Pero mal empleada, puede también minar los intentos de reducir actividades nocivas, si se hace hincapié en su ubicuidad. "Si todo el mundo lo hace, ¿por qué no debería hacerlo yo?"



3. EL COMPROMISO PUBLICO de firmar una solicitud obliga a comportarse de forma coherente con esa postura en el futuro.



4. LAS CARAS FAMILIARES venden más. Los amigos, que son personas a las que ya se estima, son poderosos vendedores, tal como descubrió la Corporación Tupperware. Los extraños se pueden vestir con la piel de la amistad para estimular la avenencia.

Las investigaciones demuestran que, como consecuencia, muchos de estos programas tienen un efecto bumerán, llegando incluso a estimular aquello que se pretende evitar.

Un programa de prevención del suicidio dirigido a adolescentes de Nueva Jersey informaba a los destinatarios sobre su elevada incidencia en ese grupo de edad. David Shaffer y su grupo de la Universidad de Columbia descubrieron que los participantes terminaron por considerar el suicidio como una posible solución a sus problemas. Las campañas que se limitan a presentar los efectos nocivos de la actividad implicada pueden resultar más eficaces, no obstante el escaso número de individuos que las cometen.

Agrado

"Afinidad", "inclinación" y "afecto" describen un sentimiento de proximidad entre personas. Pero quizá sea el término "agrado" el que aprehenda con mayor fidelidad el concepto, convirtiéndose en la designación habitual en ciencias sociales. La gente prefiere dar un sí a quienes le agradan. Considérese el éxito mundial del programa de reuniones en casa de la Corporación Tupperware. Los productos se presentan durante fiestas privadas. De esta forma, los clientes los compran directamente a una persona que les cae bien, la anfitriona, antes que a un vendedor desconocido. Los beneficios económicos de esta estrategia han sido tales que, según se informa en las publicaciones de la empresa, cada 2,7 segundos empieza una fiesta Tupperware en algún lugar del mundo. De hecho, el 75 por ciento de todas ellas se celebran no en EE.UU., sino en países menos individualistas, en los que la cohesión del grupo es más importante.

Por supuesto, la mayoría de las transacciones comerciales no se desarrollan en casa de una amiga. En circunstancias mucho más habituales, las investigaciones realizadas han demostrado el poder del agrado.

La atracción física es uno de ellos. En 1993 Peter H. Reingen, de la Universidad estatal de Arizona, y Jerome B. Kernan, de la de Cincinnati, estudiaron a los recaudadores de fondos de la Asociación Americana de Cardiología y observaron que los bien plantados generaban casi el doble de donaciones que los demás solicitantes (42 por 23 por ciento). En los años setenta Michael G. Efran y E. W. J. Patterson, de la Universidad de Toronto, descubrieron en las elecciones federales de Canadá que los votantes daban muchos más sufragios a los candidatos físicamente atractivos que a los que no lo eran. Aun así, los votantes insistían en que su elección nunca se vería influida por algo tan superficial como la apariencia.

La similitud también puede facilitar el entendimiento mutuo. Los vendedores a menudo buscan, o si es necesario improvisan al efecto, un nexo con sus clientes: "¿De veras eres de Barcelona? ¡Yo viví varios años en Hospitalet!" Los recaudadores de fondos hacen lo propio con buenos resultados, tal como observaron en 1994 R. Kelly Aune, de la Universidad de Hawai en Manoa, y Michael D. Basil, de la Universidad de Denver. Una serie de recaudadores recorrieron un recinto universitario para solicitar donaciones para una obra benéfica. Cuando añadían a la solicitud la frase "Yo también soy estudiante", las donaciones se duplicaban de largo.

Los cumplidos estimulan el agrado y los vendedores están bien entrenados en el recurso del halago. Se sabe de su efecto aun cuando sean inmerecidos, como se ha observado en la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill. Los estudios realizados han demostrado que el aprecio que se siente por el adulador no depende del fundamento de los halagos.

Se ha demostrado que la cooperación es otro factor que pone en juego sentimientos y comportamientos positivos. Los vendedores a menudo se esfuerzan para que sus clientes potenciales les perciban como colegas cooperantes. A la hora de comprar un coche, no es infrecuente que los gerentes se atribuyan la condición de "villanos" para que el vendedor pueda "luchar" en beneficio del cliente. La estrategia conduce de forma natural a un tipo deseable de agrado: el que siente el cliente por el vendedor, lo que favorece la compra.



5. EL PODER DE LA AUTORIDAD. La Asociación Nacional del Rifle tampoco es ajena a la autoridad inherente a figuras heroicas como las de Moisés, El Cid y Ben-Hur, vinculada al actor que las representó: Charlton Heston.



6. LA OFERTA LIMITADA de juguetes disponibles durante poco tiempo es un recurso de los establecimientos de comida rápida que puede llegar a estimular el apetito. La escasez puede ser adaptada para hacer que parezca un producto más deseable.

Autoridad

Recordemos el experimento que aprovechaba la validación social para conseguir que un gran número de peatones se parara en la calle y mirara hacia el cielo inducidos por un individuo. Podría haber perseguido el efecto contrario: poner en movimiento a desconocidos que se hubieran detenido, si se hubiera revestido al sujeto con el manto de la autoridad. En 1995 Monroe Lefkowitz, Robert R. Blake y Jane S. Mouton, de la Universidad de Texas en Austin, descubrieron que el porcentaje de peatones que cruzaba un semáforo en rojo siguiendo la iniciativa de un individuo podía incrementarse en hasta un 350 por ciento, mediante modificación de un único elemento del experimento. En lugar de vestir indumentaria informal, portaba símbolos de autoridad: traje y corbata.

Aquellos que proclaman su experiencia, con credenciales de expertos o científicos, puede que intenten aprovecharse del poder de la autoridad: "Los bebés son nuestro negocio, nuestro único negocio", "Nueve de cada diez dentistas recomiendan", etc. (La biografía del autor bajo estas líneas persigue, en parte, idéntico propósito.) Siempre y cuando las afirmaciones sean ciertas, no se pueden considerar un truco. Al fin y al cabo todos queremos conocer la opinión de verdaderas autoridades, porque su criterio nos ayuda a escoger pronto y bien.

El problema aparece cuando nos enfrentamos a aseveraciones falsas. Si dejamos de pensar por nosotros mismos, como suele suceder ante determinados símbolos de autoridad, es fácil que se nos manipule en la dirección equivocada por sucedáneos de expertos que se presentan con aura de legitimidad. Aquel peatón imprudente de Texas vestido con traje y corbata no tenía más autoridad para cruzar la calle que el resto de los peatones que, sin embargo, lo siguieron. Una campaña publicitaria de los años setenta de gran éxito mostraba al actor Robert Young proclamando los beneficios para la salud del café descafeinado. Young transmitía con eficacia esta opinión médica porque en esos meses representaba al galeno más famoso de la nación. Que Marcus Welby, el médico, fuera sólo un personaje de ficción televisiva pesó menos en el público que su aureola de autoridad.

ROBERT B. CIALDINI, presidente de la Sociedad de Psicología Social y de la Personalidad, ocupa la cátedra Regent de la Universidad estatal de Arizona. Su libro *Influence*, un estudio sobre las motivaciones por las que las personas se avienen a peticiones, ha aparecido en numerosas ediciones y se ha traducido a nueve idiomas. Atribuye su empedernido interés por los entresijos de la influencia al hecho de haber crecido en una familia italiana, en un barrio predominantemente polaco, en una ciudad históricamente alemana (Milwaukee), en medio de un estado rural.

Escasez

Por las mismas fechas, Stephen West, de la Universidad estatal de Florida, reparó en un suceso singular en relación con la cocina de la cafetería del campus: cierto día la valoración de las comidas empezó a subir de forma significativa en comparación con la semana previa, sin que hubiera habido cambios en el menú, la calidad de la comida o su preparación. El cambio se debió al aviso de que las comidas de la cafetería se suspenderían durante semanas, a causa de un incendio. Esta anécdota pone de relieve el efecto que produce la percepción de escasez en el discernimiento humano.

Las investigaciones demuestran que los productos y las oportunidades se nos antojan tanto más deseables cuanto menos accesibles son. Por esta razón, los comerciantes pregonan el carácter único de sus ofertas y organizan regularmente promociones "sólo por unos días sin prórroga" o que estimulan nuestra competitividad mediante campañas de ventas basadas en las "existencias limitadas".

Menos difundida está la idea de que la escasez afecta a la valoración, no sólo de los productos, sino también de la información. La información exclusiva es más persuasiva. Tómense como ejemplo los datos de la disertación de un antiguo alumno mío, Amram Knishinsky, que posee una compañía importadora de carne de vacuno, que vende a los supermercados. Para examinar los efectos de la escasez y la exclusividad sobre la avenencia, indicó a sus vendedores que llamaran a un grupo aleatorio de clientes y les preguntaran de la forma habitual si querían comprar carne de vacuno. A un segundo grupo aleatorio de clientes se les informó, además, de que estaba previsto el desabastecimiento de carne proveniente de Australia, según se deducía de determinadas previsiones meteorológicas, lo cual era cierto. La información añadida de que la carne australiana pronto escasearía dobló las ventas.

Por último, indicó a su equipo que llamaran a un tercer grupo de clientes para explicarles 1) el inminente desabastecimiento de la carne australiana y 2) que esta información había sido obtenida de fuentes *exclusivas* que la compañía tenía en el Servicio Australiano de Meteorolo-

La influencia a través de las culturas

¿Actúan los seis principios clave del proceso de influencia social de forma similar en los distintos países? Sí, pero con un matiz. Los ciudadanos del mundo son, al fin y al cabo, humanos y susceptibles a las tendencias fundamentales que caracterizan a todos los miembros de nuestra especie. Las normas culturales, las tradiciones y las experiencias pueden, sin embargo, modificar la importancia relativa de cada factor.



Consideremos los resultados de un informe publicado este año por Michael W. Morris, Joel M. Podolny y Sheira Ariel, de la Universidad de Stanford, quienes estudiaron a empleados del Citibank, una entidad financiera multinacional. Los investigadores seleccionaron para su estudio cuatro sociedades: la estadounidense, la china, la española y la alemana. Supervisaron las sucursales de Citibank en cada país y evaluaron la disposición de los empleados a aceptar de forma voluntaria la petición de un compañero para que se le ayudara con una tarea. A pesar de que pudieran entrar en juego múltiples factores, la razón principal por la que los empleados se sintieron obligados a aceptar fue diferente en los cuatro países y remitía a un principio fundamental de influencia social distinto.

Los empleados estadounidenses adoptaron un enfoque basado en la reciprocidad antes de aceptar. Se plantearon la cuestión: “¿Qué ha hecho últimamente esta persona por mí?” Se sentían obligados a consentir si le debían al solicitante un favor.

Los empleados chinos respondieron al factor autoridad, en forma de lealtad a aquellos de alto rango dentro de su pequeño grupo. Preguntaban: “¿Está relacionado este peticionario con alguien de mi unidad y, en especial, con alguien que sea de alto rango?” Si la respuesta era sí, cedían.

El personal español de Citibank basaba su decisión, sobre todo, en el agrado. Estaban dispuestos a ayudar en razón de las normas de amistad que impulsan la lealtad al amigo, independientemente de su posición o estatuto. Preguntaban: “¿Pertenece el peticionario al círculo de mis amigos?” Si la respuesta era sí, se mostraban prestos a la ayuda.

Los empleados alemanes se guiaron, en su mayoría, por la coherencia en relación con las normas de la organización. Decidían si aceptar o no planteándose la pregunta: “De acuerdo con la normativa oficial y las categorías, ¿estoy obligado a ayudar a este solicitante?” Si la respuesta era sí, sentían la firme obligación de satisfacer la solicitud.

En suma, a pesar de que todas las sociedades humanas parecen utilizar el mismo conjunto de reglas de influencia, el peso asignado a las distintas reglas puede diferir entre las culturas. Estas diferencias deben tenerse en cuenta cuando se pergeñen programas de persuasión destinados a diversas culturas.

gía. Los clientes aumentaron sus pedidos en más del 600 por ciento. Se vieron cogidos en una trampa doble: la escasez no sólo afectaba a la carne, sino a la misma información de que la carne escasearía.

Conocer es poder

Importa destacar que muchos de los datos presentados proceden de estudios sobre prácticas de persuasión empleadas por los profesionales —comerciantes, publicistas, vendedores, recaudadores de fondos y sus compañeros— cuyo bienestar económico depende de sus habilidades para conseguir que los demás digan sí. Opera aquí una especie de selección natural, de suerte que los que recurren a métodos infructuosos deben retirarse del negocio. Por el contrario, aquellos que utilizan procedimientos que funcionan bien, sobrevivirán, prosperarán y transmitirán sus acertadas estrategias. Con el tiempo, sin embargo, los principios de influencia social más efectivos aparecerán en los repertorios de las profesiones que precisan persuasión a largo plazo. Mi propio trabajo indica que estos principios encarnan las seis tendencias humanas fundamentales aquí examinadas: reciprocidad, coherencia, validación social, agrado, autoridad y escasez.

Desde un punto de vista evolutivo, cada uno de estos comportamientos se habría seleccionado en los animales que, como nosotros mismos, persiguen su supervivencia en el contexto de grupos sociales. En la gran mayoría de los casos estos principios nos guían por el buen camino. En general, es conveniente devolver los favores, comportarse de forma coherente, seguir los pasos de nuestros semejantes, avenirse a las peticiones de aquellos que nos gustan, acatar la autoridad y saber apreciar los recursos que escasean. Quienes aplican estos principios de forma honrada nos hacen un favor. Si una empresa de publicidad basa una campaña en el auténtico peso y autoridad del conocimiento científico a favor de un producto contra el dolor de cabeza, todos nos beneficiaremos —la agencia, el fabricante y los compradores—. No ocurriría lo mismo si la agencia, al no encontrar particulares méritos científicos del calmante, usurpara el principio de autoridad con actores y los vistiera con bata blanca.

¿Estamos irremediablemente condenados a sufrir todas estas posibles manipulaciones? No. Si comprendemos las técnicas de persuasión, podremos identificar las estrategias y analizar con claridad las peticiones y las ofertas que se nos presenten. Nuestra labor consistirá en velar por la aplicación responsable de los seis poderosos incentivos por parte de los profesionales de la persuasión. Sólo cuando hayan actuado con sinceridad durante el proceso podremos comprar sus productos y servicios, apoyar sus propuestas políticas o hacer donaciones para sus causas.

Si hacemos esta vital distinción en nuestros tratos con los practicantes de las artes persuasivas, rara vez nos veremos abocados a la avenencia inducida. En lugar de eso, dispondremos de una opción mucho mejor: que se nos informe para decir que sí.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PSYCHOLOGY OF ATTITUDE CHANGE AND SOCIAL INFLUENCE. Phillip G. Zimbardo y Michael R. Leippe. Temple University Press, 1991.

BARGAINING FOR ADVANTAGE. G. Richard Shell. Viking, 1999.

AGE OF PROPAGANDA: THE EVERYDAY USE AND ABUSE OF PERSUASION. Anthony J. Pratkanis. W. H. Freeman and Company, 2000.

INFLUENCE: SCIENCE AND PRACTICE. Cuarta edición. Robert B. Cialdini. Allyn & Bacon, 2001.

UNIONES TUNEL MAGNETICAS

Entre dos materiales magnéticos separados por un aislante fluye una corriente túnel, que depende de este tercer material. Modulable por un campo magnético, se le abren numerosas aplicaciones industriales

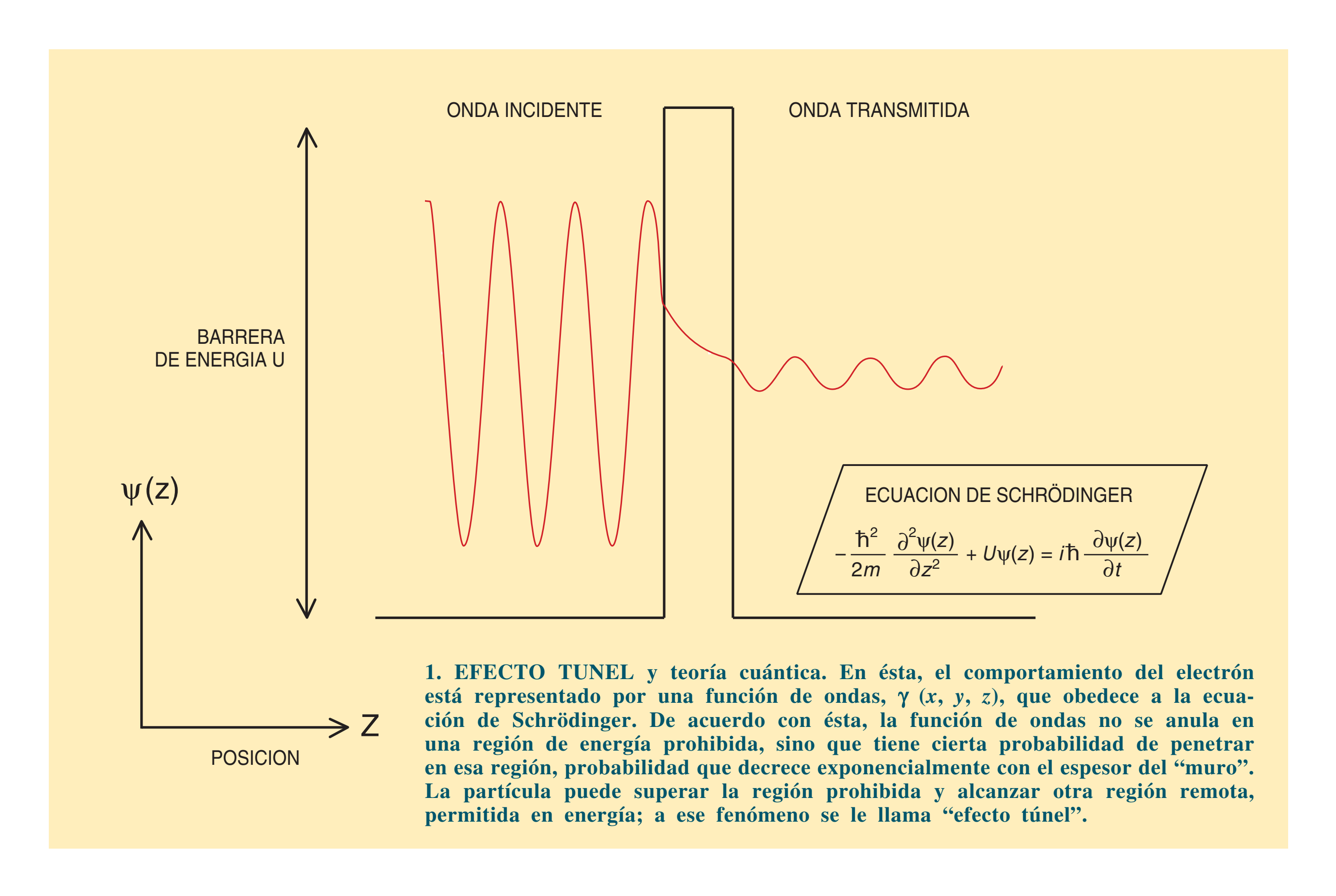
José María De Teresa Nogueras

"Quien no se sienta abrumado por la teoría cuántica es que no la ha entendido", decía Niels Bohr. Entre las maravillas del micromundo que predice, una llama en especial la atención, el efecto túnel, propuesto por Erwin Schrödinger. ¿En qué consiste?

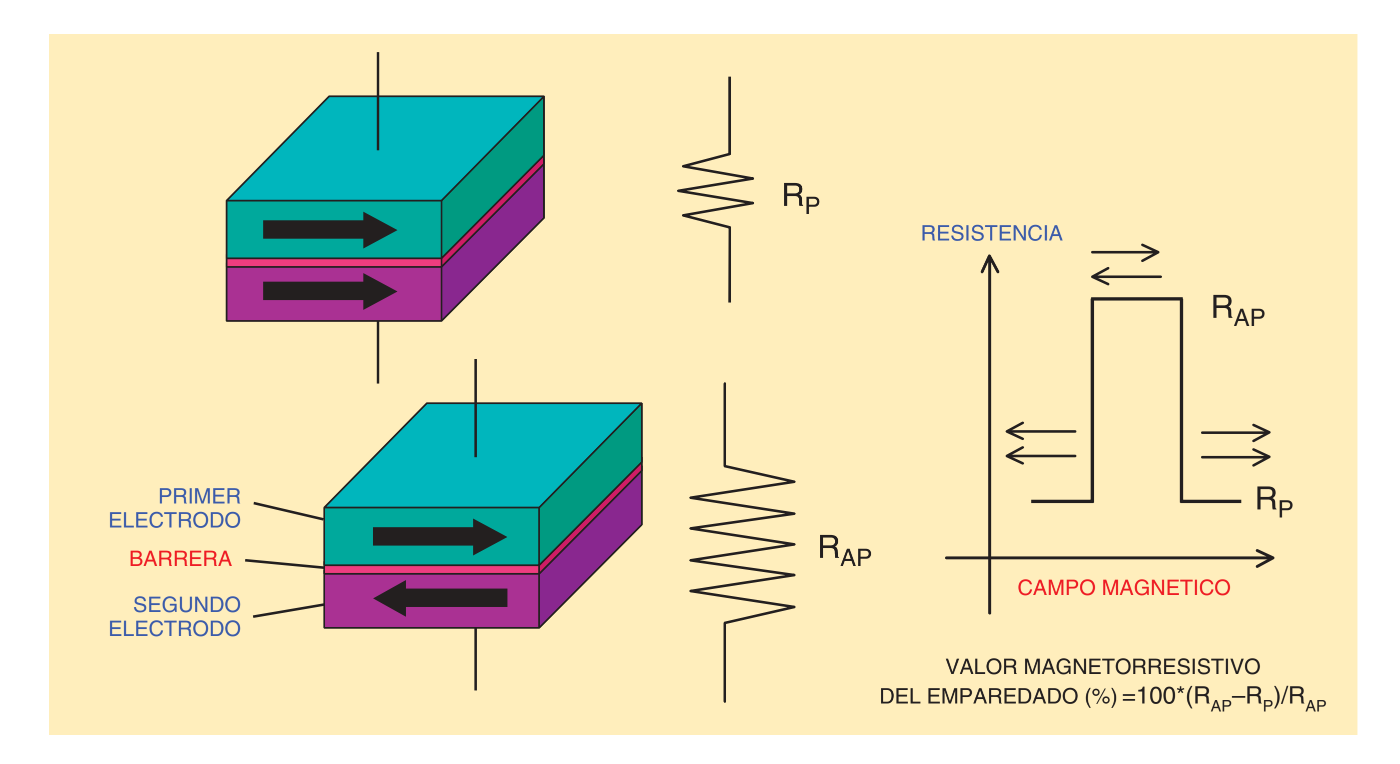
Si lanzamos una pelota contra una pared rebota, vuelve hacia nosotros. Si queremos que pase al otro lado, debemos darle mayor impulso vertical, para que adquiera la energía necesaria y salte la tapia. Pero en el mundo microscópico las cosas proceden de una manera distinta. Fijémonos en el electrón. Esta partícula puede transitar (con rigor, "tiene una cierta probabilidad de transitar") a través de una región que le estaría prohibida si nos guiáramos por la energía adquirida. Atraviesa la pared como si de un fantasma se tratase gracias al efecto túnel, que lejos de constituir una entidad misteriosa es una consecuencia de la ecuación que rige el movimiento de las partículas subatómicas, la ecuación de Schrödinger.

La primera prueba experimental del efecto túnel se produjo en 1928, cuando Robert Oppenheimer se apoyó en él para describir el mecanismo en cuya virtud los átomos de hidrógeno excitados pierden su electrón en presencia de un campo eléctrico intenso. Más tarde, se reclamó su auxilio para explicar la emisión de partículas alfa (átomos de helio despojados de sus dos electrones) por núcleos pesados, así como la emisión de electrones por metales al aplicar un campo eléctrico. En todos estos casos, el efecto túnel permite que una partícula escape de las fuerzas que le ligan al núcleo o al sólido.

Con la construcción del magnetómetro SQUID ("Superconducting Quan-



1. EFECTO TUNEL y teoría cuántica. En ésta, el comportamiento del electrón está representado por una función de ondas, γ (*x*, *y*, *z*), que obedece a la ecuación de Schrödinger. De acuerdo con ésta, la función de ondas no se anula en una región de energía prohibida, sino que tiene cierta probabilidad de penetrar en esa región, probabilidad que decrece exponencialmente con el espesor del "muro". La partícula puede superar la región prohibida y alcanzar otra región remota, permitida en energía; a ese fenómeno se le llama "efecto túnel".



2. UNA UNION TUNEL MAGNETICA es un emparedado formado por dos electrodos metálicos magnéticos separados por una barrera aislante. Al aplicar una tensión eléctrica, aparece una corriente constituida por electrones que realizan el efecto túnel entre los electrodos a través de la barrera. La resistencia eléctrica de la unión cuando las imanaciones de los electrodos se hallan paralelas entre sí, R_P, difiere de la resistencia cuando están antiparalelas, R_{AP}. Si inducimos un pequeño campo magnético, permutan ambas configuraciones y se observa un efecto magnetorresistivo con múltiples aplicaciones técnicas.

tum Interference Device") llegó otra aplicación del fenómeno. Mediante ese dispositivo superconductor de interferencia cuántica se obtenían mediciones de campos magnéticos con suma precisión. El ingenio se basaba en un sistema de uniones Josephson (así llamadas en honor de Brian David Josephson, físico británico), en el que fluía corriente, gracias al efecto túnel, entre dos superconductores separados por un aislante.

De no menor interés resultó otra aplicación: el microscopio de barrido de efecto túnel, o STM ("Scanning Tunnelling Microscope"). Inventado por Gerd Binnig y Heinrich Rohrer, en él los electrones pasan, por efecto túnel, de la superficie que queremos observar a la punta del microscopio, proporcionándonos información sobre su topología, rugosidad y demás propiedades.

Cuando en 1959 Richard Feynman predijo, en la reunión anual de la Sociedad Norteamericana de Física, que en el futuro cabría la *Enciclopedia Británica* en la cabeza de un alfiler, la mayoría lo consideró una *boutade* del genio. No hemos llegado a ese extremo, pero Feynman no erraba al prever la vertiginosa evolución de los procesos de almacenamiento y lectura de la información. El responsable de tan espectacular avance es la ciencia de materiales, con su dominio creciente de escalas cada vez menores. La miniaturización de los dispositivos ha creado una subdisciplina, la *nanotecnología*, que se ocupa del control de los materiales en los que al menos una de sus dimensiones es del orden del nanómetro (10^{-9} m, equivalente a 4 o 5 átomos puestos en fila).

Las uniones túnel magnéticas pertenecen al ámbito de los nuevos materiales nanoestructurados. Muy prometedoras en aplicaciones magnetoelectrónicas, tales uniones obedecen a la física del efecto túnel dependiente del espín. Una unión túnel magnética es una suerte de emparedado constituido por dos capas conductoras magnéticas, los electrodos, separadas por una capa eléctricamente aislante, la barrera.

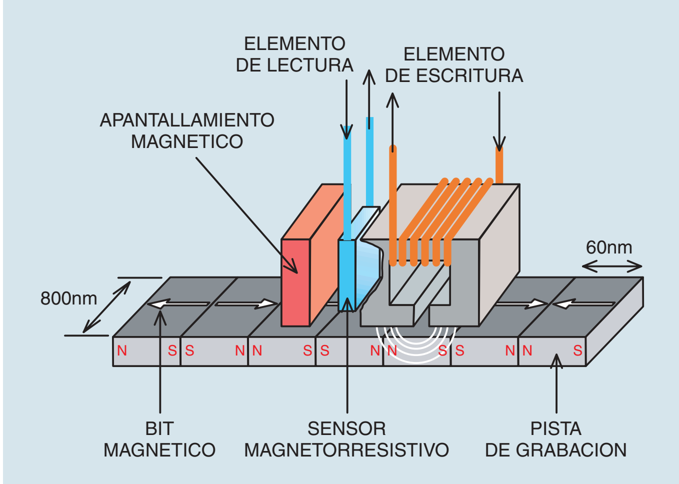
Al aplicar una tensión eléctrica entre los electrodos, aparece una corriente eléctrica, generada por el tránsito de electrones de un electrodo a otro, por efecto túnel, a través de la barrera. El espesor de la barrera ha de medir unos pocos nanómetros para que el efecto túnel sea eficiente y la corriente adquiera cierta intensidad; en principio, la corriente decrecerá de una forma exponencial con el aumento del espesor de la barrera.

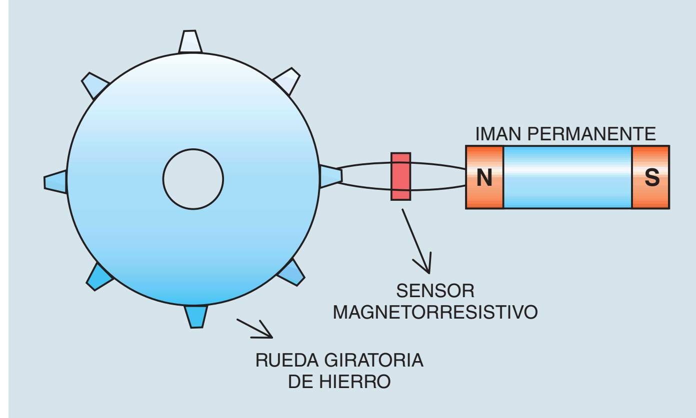
El interés de las uniones túnel magnéticas reside en la magnetorresistencia túnel que presentan, un fenómeno descubierto en 1975 por M. Jullière. Este físico francés creó emparedados con electrodos magnéticos de hierro y barreras de germanio y observó experimentalmente que la resistencia eléctrica variaba al aplicar un campo magnético. Propuso que la corriente túnel dependía de la orientación relativa de las imanaciones de los dos electrodos magnéticos.

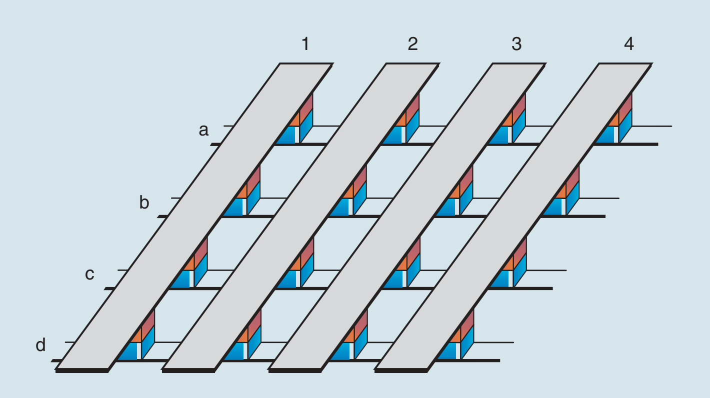
Aplicando un campo magnético podemos modificar el ángulo que forman las imanaciones y producir el fenómeno de magnetorresistencia túnel. Entre las configuraciones paralela y antiparalela de las imanaciones se da la mayor diferencia en resistencia, diferencia que sirve para obtener el valor magnetorresistivo del emparedado (MRT).

Al trabajo pionero de Jullière le siguieron 20 años de estancamiento por culpa, sobre todo, de la dificultad que entrañaba la preparación de barreras con buenas propiedades aislantes y resultados reproducibles. Por fin, en 1995 Magaadesh Moodera, del

APLICACIONES DE LAS UNIONES TUNEL





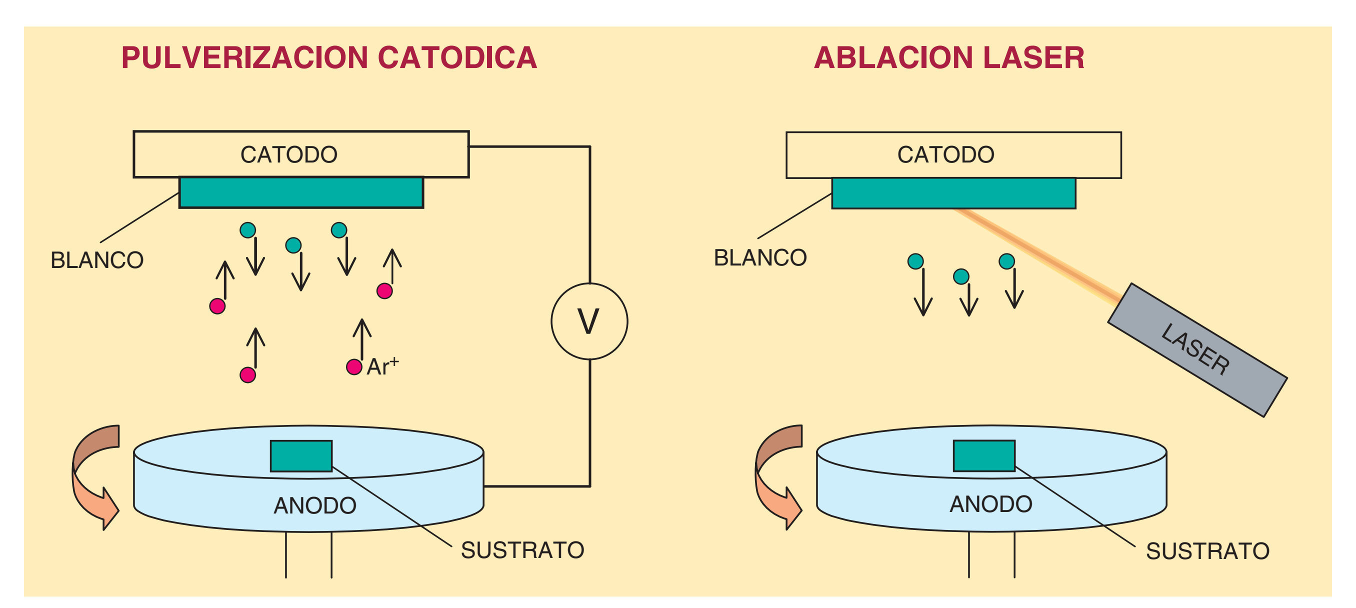


En las cabezas que se usan en los ordenadores actuales, se escribe la información generando un campo magnético por medio de un hilo conductor enrollado sobre un núcleo de hierro (*arriba*). La lectura se lleva a cabo mediante un sensor magnetorresistivo que detecta las direcciones del campo magnético creado por los bits. En un futuro próximo, los sensores podrían sustituirse por las uniones túnel, dotadas de altos valores de magnetorresistencia que les permiten detectar bits cada vez menores.

Se están introduciendo también sensores magnetorresistivos en una amplia gama de dispositivos (*centro*). Por ejemplo, en aplicaciones mecánicas. Una rueda dentada de hierro u otro material magnético en giro perturba el campo magnético que experimenta un sensor magnetorresistivo situado entre la rueda y un imán permanente, y modifica, por tanto, su resistencia. Al detectarse el paso de un diente junto al sensor, puede calcularse la velocidad de giro de la rueda. Se trata de un dispositivo muy útil para el control de máquinas que deben girar a velocidades celerísimas y precisas, para medir las revoluciones del motor de un automóvil, en tacómetros, etcétera.

En el dominio de la biología, podrían aprovecharse tales sensores para sondear muestras magnéticamente marcadas. Imaginemos que recubrimos partículas magnéticas con un anticuerpo que se une a un antígeno bien definido (virus, bacteria). Se mezclan luego los marcadores magnéticos con la disolución que contiene el antígeno a detectar. Se vierte la disolución mezcla en un chip con sensores magnetorresistivos en cuyo extremo se ha colocado un anticuerpo específico contra el antígeno. Los antígenos (con las partículas magnéticas que acarrean) se anclan sobre los sensores, crean un campo magnético y cambian la resistencia del sensor. Con ello puede estimarse la concentración del antígeno en la disolución.

Las uniones túnel revisten particular interés en la construcción de memorias no volátiles (*abajo*). Se disponen éstas en una red, quedando los electrodos superiores e inferiores conectados eléctricamente por líneas de corriente. La unión túnel tiene dos estados magnéticos principales: configuraciones magnéticas paralela y antiparalela, bits “1” y “0”. Las configuraciones originan dos estados de resistencia diferentes. Para conocer la resistencia de la unión túnel de la posición (2,b), aplicamos tensión entre los extremos de las líneas 2 y b; la corriente atraviesa esta unión, cuya lectura nos informa de la resistencia, luego también de la configuración magnética. Para modificar la información de una unión (escritura), hay que alterar su configuración magnética. Eso se conseguirá haciendo pasar corriente a lo largo de las líneas 2 y b, creándose un campo magnético que se suma sólo sobre la unión (2,b) y permite girar la imanación de uno de los electrodos de la unión. Pero hay un problema: cuando se efectúa la lectura de la información, al aplicar la tensión entre 2 y b, la corriente no sólo cursa a través de la unión (2,b), sino que nada impide que una parte de la misma realice el trayecto (2,a)→(a,1)→(1,b). Para evitarlo, se coloca un diodo debajo de cada unión, que se activa para seleccionar sólo esta unión. Cada vez se controla mejor la integración de los diodos y las uniones túnel en el mismo chip. Se intenta conseguir que la lectura y escritura pueda realizarse en nanosegundos.



3. ENTRE LAS TECNICAS para la preparación de películas delgadas y uniones túnel predominan la pulverización catódica y la ablación láser. En la primera, se establece un voltaje entre el cátodo, donde se sitúa el material que queremos depositar (blanco), y el ánodo, donde se sitúa el sustrato. La cámara de deposición está llena de un gas en forma de plasma; los iones positivos del plasma son atraídos por el cátodo, golpean el blanco y arrancan átomos del mismo. Los átomos eyectados del blanco alcanzan el sustrato y se depositan sobre él, formando una película delgada. Este sistema se usa sobre todo para el crecimiento de metales en forma policristalina. En el caso de la ablación láser, la energía proporcionada por un láser que incide sobre el blanco arranca átomos. Es una técnica especialmente indicada para el crecimiento de materiales óxidos en forma monocristalina, por lo que es de uso frecuente en superconductores de alta temperatura crítica (tipo $YBa_2Cu_3O_{6+\delta}$), en óxidos magnéticos ($La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$, etc.) y en óxidos aislantes ($SrTiO_3$, etc.). En ambas técnicas, el plato sobre el que se coloca el sustrato gira para lograr un crecimiento homogéneo.

Instituto de Tecnología de Massachusetts, lograba en uniones túnel, con electrodos de cobalto y barreras de alúmina (Al_2O_3), valores de magnetorresistencia elevados a temperatura ambiente y reproducibles.

El descubrimiento despertó un renovado interés por las uniones túnel magnéticas. Junto a algunos laboratorios de investigación básica, el mayor empeño lo pusieron las empresas del sector de almacenamiento magnético, como IBM, Hewlewtt Packard, Motorola, Honeywell y NonVolatileElectronics.

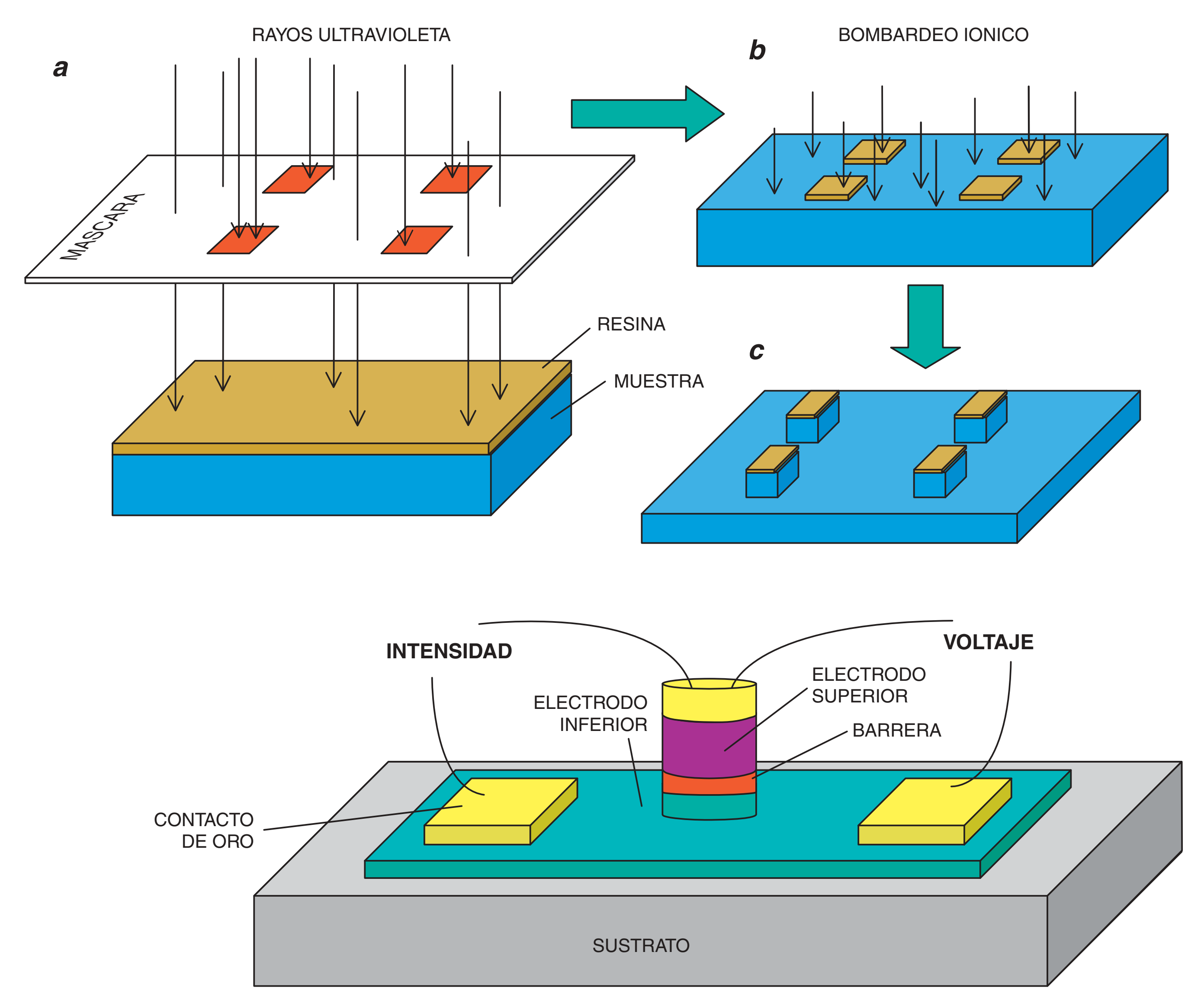
Los dispositivos magnetorresistivos son utilizados habitualmente en las cabezas lectoras de discos duros de ordenador, en sensores de campo magnético y en memorias no volátiles. En los discos duros se almacenan, en promedio, unos 10 gigabit por pulgada cuadrada, es decir, 10^{10} bits por cada 6,5 cm^2 de espacio del disco. Cada bit es una pequeña porción de un material magnético (una aleación de cobalto), cuya imanación puede apuntar en dos direcciones distintas y determinar, por ende, que el bit sea un “1” o un “0”.

Una cabeza lectora que vuela 20 nanómetros por encima del disco duro debe detectar la dirección de la imanación para así interpretar el bit como un “1” o un “0”. El principal elemento de la cabeza lectora es un material magnetorresistivo, dotado de sensibilidad para percibir variaciones minúsculas del campo magnético creado por los bits. El estado “1” o “0” del bit queda reflejado en dos valores de la resistencia del elemento magnetorresistivo, efectuándose de este modo la lectura de la información. En esa aplicación se usan ahora, por material magnetorresistivo, multicapas metálicas hechas de emparedados de capas magnéticas (Fe, Co) separadas por capas metálicas no magnéticas (Cr, Cu). El efecto de magnetorresistencia se produce en razón de la forma diferente en que los electrones sufren colisiones, lo que depende de que las capas magnéticas tengan o no su imanación en la misma dirección.

Con la técnica disponible puede avanzarse todavía en el camino de la miniaturización, con ligeras modificaciones de los tipos de materiales magnéticos que actúan de bits y de las cabezas lectoras, y alcanzar densidades de almacenamiento de 80 gigabit por pulgada cuadrada. Se espera lograrlo hacia el año 2005 utilizando como elementos magnetorresistivos de las cabezas lectoras las uniones túnel; se confía en su altísima magnetorresistencia y, por tanto, en su finísima sensibilidad para detectar bits cada vez menores. La compañía IBM trabaja ya con magnetoresistencias del 40 % a pequeños campos magnéticos (5 militesla) en uniones túnel con electrodos magnéticos de metales de transición y barreras de alúmina.

Las uniones túnel magnéticas podrían constituirse en sensores ultrasensibles de campo magnético. Se habla incluso de su capacidad para detectar campos de sólo 10^{-12} tesla. Aprovechando tamaño potencial, podrían introducirse en el dominio de la detección de actividad neuronal, las minas antipersonales y la medición del campo terrestre, así como en el ámbito de los sensores mecánicos (de posición, tacómetros e interruptores de proximidad). Téngase presente que los sensores magnetorresistivos ofrecen prestaciones superiores a los sensores de efecto Hall y otros que pudieran entrar en liza.

Sin embargo, donde se vislumbran aplicaciones más prometedoras es en el terreno de las memorias no volátiles. En las memorias de acceso aleatorio, o memorias RAM, de los ordenadores se aplica la técnica de semiconductores; para no perder la información, deben refrescarse cada 2 milisegundos; se trata, pues, de una memoria volátil que consume mucha



4. LOS PROCESOS LITOGRAFICOS recuerdan al revelado fotográfico. En litografía óptica se cubre con resina fotosensible la muestra sobre la que queremos definir un patrón, impreso sobre una máscara que se sitúa encima de la muestra. La máscara constituye un soporte transparente sobre el que hay ciertos motivos o depósitos metálicos que no dejan pasar la luz. Con una lámpara de rayos ultravioleta (*a*) se ilumina la muestra; la luz sólo pasa por la zona exenta de dibujo. La luz que incide sobre la resina rompe las cadenas poliméricas que la forman, quedando ésta sensibilizada. Al sumergir la muestra en un revelador, se disuelve la resina sensibilizada y queda resina con la forma de los motivos. Si hacemos un bombardeo de iones de argón u oxígeno de la muestra (*b*), las partes donde quedó resina están protegidas, mientras que el resto comienza a ser roído. Una vez roída la profundidad requerida (*c*), disolvemos la resina de protección con acetona y así obtenemos una muestra estructurada con los motivos dibujados sobre la máscara. La resolución de esta técnica gira en torno al micrometro. Con una serie de etapas litográficas de este estilo se puede llegar a obtener a partir de un emparedado, una unión túnel como la mostrada en la figura inferior. A través de los contactos de oro evaporados sobre los electrodos superior e inferior, podemos inyectar corriente en la unión y medir la caída de voltaje para calcular la resistencia de la misma.

energía. Lo sufren los usuarios de ordenadores portátiles, que dependen a menudo de la carga de la batería. Por ello se están desarrollando prototipos de memorias RAM magnéticas basadas en uniones túnel dispuestas en filas y columnas; cada unión túnel representa un bit, con la peculiaridad de que una configuración magnética paralela de los electrodos corresponde a un bit "1" y una antiparalela a un bit "0". No se puede todavía integrar múltiples uniones de éstas en un espacio reducido, pero se progresa a buen ritmo para superar esa limitación en la capacidad de almacenamiento de información de tales memorias.

Junto a la no volatilidad, este tipo de memorias ofrecen una rápida lectura, resisten la radiación del entorno (característica importante en aplicaciones aeronáuticas y espaciales) y admiten quizás una notable densidad de integración sobre diodos de semiconductores, aspecto este último en fase de estudio.

¿De qué modo se preparan las uniones túnel? Mediante técnicas de crecimiento como la ablación láser y la pulverización catódica, se empieza por depositar sobre un sustrato el primer electrodo, hasta que se forme un espesor de decenas de nanómetros. Se crea luego la barrera aislante, de unos pocos nanómetros, para termi-

JOSE MARIA DE TERESA investiga en el Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, donde realizó su tesis doctoral sobre los mecanismos que producen la magnetorresistencia colosal en óxidos magnéticos. En el laboratorio de la Unidad Mixta CNRS/Thomson-CSF en Orsay estudió luego aspectos básicos y aplicados del efecto túnel en sólidos.

nar con la deposición del electrodo superior, de tamaño igual al electrodo primero. El conjunto se blinda a la oxidación o la contaminación con un revestimiento nanométrico de un metal noble.

El proceso de crecimiento de las uniones requiere la máxima finura, pues hay que controlar la deposición de cada capa atómica. La barrera debe ser continua, sin rugosidades y homogénea en su espesor, para prevenir cortocircuitos y acoplamientos magnéticos indeseables entre los electrodos. La corriente túnel tiene que ser homogénea a través de la unión. Para comprobar la calidad del crecimiento, se recurre, entre otras, a la técnica de microscopía electrónica de transmisión (TEM), que permite representar con óptima resolución la barrera y sus aledaños en un corte transversal del emparedado.

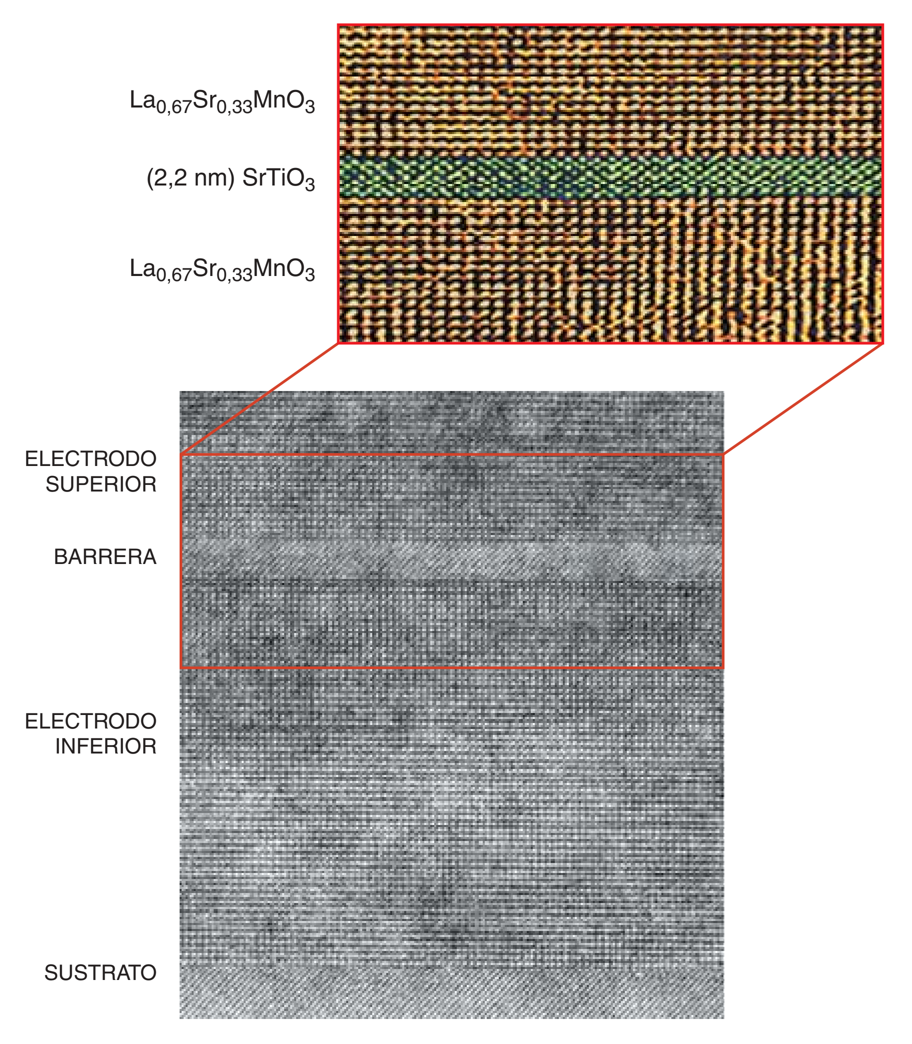
El resultado del proceso de crecimiento es un emparedado de un centímetro cuadrado de superficie. La oblea obtenida se trocea en dados, cada uno de los cuales constituirá una unión túnel. Se deposita, además, vapor de oro en los lugares adecuados para establecer los contactos eléctricos que faciliten las medidas de magnetotransporte. En ese proceso de impresión se emplea la técnica de litografía óptica, bien conocida en la electrónica de semiconductores, para proteger ciertas zonas del emparedado con resinas sensibles a la luz ultravioleta y máscaras con dibujos micrométricos. El posterior bombardeo con iones de argón elimina las zonas del emparedado no protegidas con la resina, delimitándose así uniones túnel cuyo diámetro oscila entre 1 y 300 micrometros.

A través de ese procedimiento hemos llegado a una unión túnel con forma de pilar de diámetro micrométrico. El paso siguiente consiste en depositar un aislante sobre el emparedado, que imposibilite los contactos espurios entre los electrodos; y se pulveriza vapor de oro en ciertos lugares para disponer de contactos eléctricos sobre los electrodos inferior y superior. La corriente que investigamos cursa a lo largo del pilar, es decir, entre el electrodo inferior y superior a través de la barrera.

En la fabricación, pues, de uniones túnel intervienen la síntesis de materiales nanométricos, técnicas de caracterización estructural, litográficas y, por fin, el análisis de sus propiedades magnéticas y de magnetotransporte. Algunos de los procesos descritos revisten cierta complejidad y requieren técnicas muy depuradas sólo al alcance de ciertos laboratorios. Entre ellos, el dirigido por Albert Fert en Orsay, donde en 1988 se descubrió la magnetorresistencia gigante en multicapas metálicas y donde recientemente el autor ha investigado los mecanismos que determinan la magnetorresistencia en uniones túnel magnéticas.

En numerosas ocasiones la teoría que explica un fenómeno físico está perfilada mucho antes de que puedan observarse por vía experimental los fenómenos que predice. Pensemos en el bosón de Higgs, cuya observación se espera en los experimentos que se realizarán cuando el proyectado gran colisionador de hadrones del CERN entre en funcionamiento. No se discute sobre su existencia, predicha por la teoría, sino sobre la masa exacta que tendrá dicha partícula.

En otros apartados de la física, la observación experimental de un fenómeno e incluso sus aplicaciones técnicas ocurren mucho antes de que



5. UNA DE LAS TECNICAS MICROSCOPICAS más interesantes para caracterizar la calidad de una unión túnel es la microscopía electrónica de transmisión (TEM). En ella se hace un corte transversal del emparedado y se representan las capas atómicas que lo forman. En esta fotografía tomada por R. Lyonnet y J. L. Maurice, de la Unidad Mixta de Investigación CNRS/Thomson-CSF en Orsay, puede apreciarse que en la unión la barrera, formada por aproximadamente 5 capas de átomos, es plana y homogénea en espesor, características necesarias para observar efectos magnetorresistivos.

se conozca la teoría subyacente. En tal situación se encuentra la física del efecto túnel dependiente del espín, donde se enmarca el estudio de las uniones túnel magnéticas. Contamos con prototipos de dispositivos electrónicos basados en ellas, pero carecemos de un cuerpo doctrinal coherente sobre su naturaleza, pese a que hace un cuarto de siglo que se descubrió la magnetorresistencia túnel.

Sabemos que el fenómeno de la magnetorresistencia túnel existe gracias al espín del electrón, una suerte de imán microscópico portado por el electrón. El espín del electrón presenta dos orientaciones posibles, "arriba" y "abajo". Sin embargo, su número de estados difiere en un material magnético. En el artículo donde describía su hallazgo de la magnetorresistencia túnel, Jullière esbozaba un modelo teórico. Suponía que la corriente túnel era la suma de dos contribuciones independientes, la de electrones con espín "arriba" y "abajo" que realizaban el efecto túnel desde el primer electrodo al segundo, sin alterar su dirección de espín. Puesto que en un material magnético no existía el mismo número de estados vacíos de direcciones "arriba" y "abajo", la probabilidad de que un electrón con una cierta dirección de espín del primer electrodo realizara el efecto túnel dependería del número de estados vacíos con esa misma dirección de espín que hubiera en el segundo electrodo.

Con ese planteamiento, Jullière calculó cuáles serían las corrientes túnel en el caso de que las imanaciones de los electrodos estuviesen paralelas o antiparalelas. Halló que las corrientes túnel podían expresarse en función de la polarización de espín, propiedad de los materiales magnéticos que consiste en la diferencia entre el número de electrones "arriba" y "abajo" de un material a la energía de Fermi. (Así se llama el nivel de máxima energía que está ocupado por los electrones en el material.) De acuerdo con la formulación de su propuesta, los máximos efectos magnetorresistivos ocurrirían cuando los electrodos fueran materiales magnéticos de elevada polarización de espín.

En los años setenta, R. Meservey y P. M. Tedrow, del MIT, idearon un modo de determinar experimentalmente dicho parámetro. Si en lugar de preparar una unión túnel con dos electrodos magnéticos, se emplea uno magnético y el otro superconductor podemos nosotros determinar la polarización de espín del material magnético. En efecto, se conocen los estados energéticos vacíos que hay disponibles en el superconductor y, al aplicar un campo magnético el superconductor actúa como un analizador de la dirección de espín de los electrones que realizan el efecto túnel entre el electrodo magnético y el superconductor.

En su experimento, Meservey y Tedrow analizaron la polarización de espín del hierro, cobalto y níquel, metales de transición; utilizaron barreras de alúmina y, por electrodo superconductor, el aluminio a temperaturas extremadamente bajas. No esperaban el resultado obtenido: encontraron para todos ellos que la polarización de espín era positiva, es decir, que en estos materiales había siempre en el nivel de Fermi más electrones "arriba" que "abajo", en clara discordancia con los cálculos teóricos, según los cuales la polarización debía ser positiva para el hierro y negativa para el cobalto y el níquel.

Muchos recibieron los datos con escepticismo. Pero, por diversos que fueran los argumentos esgrimidos en pro de una polarización de espín siempre positiva, nunca se confirmó. Por nuestra parte, hemos observado que la polarización de espín de un material en una unión túnel depende de la barrera aislante utilizada en la misma.

Partiendo del modelo de Jullière para calcular la magnetorresistencia túnel, se halla que ésta es máxima cuando se usan electrodos que poseen polarización de espín máxima, igual a 1. Ello significa que, en el nivel de Fermi, sólo hay electrones con una dirección de espín. A ese tipo de materiales se les llama "medio metales" o semimetálicos.

Las prestaciones que ofrece cualquier dispositivo diseñado para trabajar en la electrónica de espín alcanzan un rendimiento máximo cuando se emplean medio metales. De ahí su búsqueda afanosa. Hasta la fecha se conocen la magnetita (Fe_3O_4), el dióxido de cromo (CrO_2), las aleaciones Heusler (NiMnSb y compuestos ternarios del mismo tipo), las manganitas ($La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$ y similares) y las más recientes dobles perovskitas (Sr_2FeMoO_6 y otras).

En general, se trata de materiales difíciles de preparar en forma de películas delgadas de dimensiones nanométricas, las de interés industrial. Por eso se recurre a Fe, Co y otros

$$P(E_F) = \frac{N\uparrow(E_F) - N\downarrow(E_F)}{N\uparrow(E_F) + N\downarrow(E_F)}$$

$N\uparrow(E_F)$ = Número de electrones ↑ en la energía de Fermi

$N\downarrow(E_F)$ = Número de electrones ↓ en la energía de Fermi

a **b**

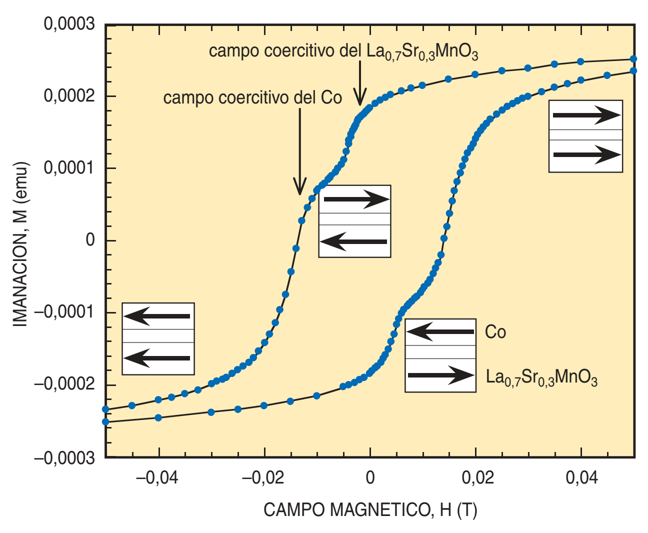
ENERGIA DE FERMI

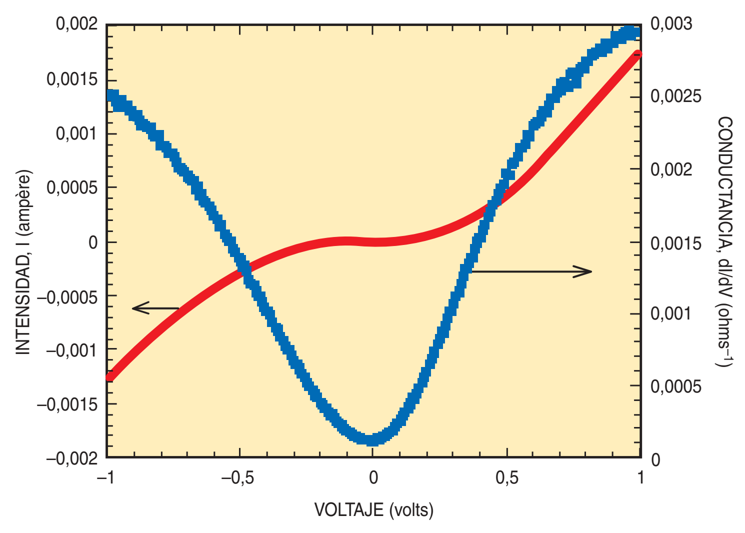
ENERGIA

DENSIDAD DE ESTADOS ELECTRONICOS

MEDIO METAL

6. EN UN MATERIAL MAGNETICO existen bandas electrónicas desplazadas en energía para electrones con distinta dirección de espín, razón por la cual muestran una imanación macroscópica. En la máxima energía de ocupación de estas bandas, la energía de Fermi, no hay el mismo número de electrones con espín arriba (↑) que abajo (↓). Se denomina polarización de espín a la diferencia entre el número de electrones ↑ y ↓ en el nivel de Fermi dividido por su suma. Puede ser positiva o negativa a tenor de cuál de las dos direcciones sea la más frecuente en el nivel de Fermi. En el ejemplo *a*, la polarización de espín es negativa. En *b* se muestra el caso de un medio metal con polarización de espín negativa máxima.





7. CUANDO SE MIDE LA IMANACION de un emparedado $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3/SrTiO_3/Co$, se observa que, al barrer un campo magnético, la imanación de la manganita y la del cobalto cambian de dirección para valores distintos del campo aplicado. En un cierto rango de campos magnéticos es posible obtener así una configuración magnética antiparalela de los electrodos, lo que a su vez permite medir la resistencia tanto en la configuración magnética paralela como antiparalela y obtener la magnetorresistencia de la unión túnel. Al medir en una unión túnel la intensidad que la atraviesa en función del voltaje aplicado, la relación es no lineal, a diferencia de lo que sucede en un metal. Al representar la conductancia, que es la derivada de la intensidad frente al voltaje, en el metal se observaría que permanece constante con el voltaje aplicado, mientras que en el caso de una unión túnel aparecerían relaciones parabólicas o de más alto orden.

materiales que, aunque muestran una polarización de espín menor, se manipulan mejor. Se han obtenido buenos resultados en las manganitas $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$ usadas en uniones túnel a bajas temperaturas, lo que, en el modelo de Jullière, corresponde a una polarización de espín muy elevada. Cierto es que no se ha alcanzado el valor máximo que se espera para tales manganitas, que presentan, además, el inconveniente de que su polarización de espín disminuye con rapidez al aumentar la temperatura, un verdadero escollo para aplicaciones a temperatura ambiente. Son ideales, sin embargo, para estudios de carácter básico, como se comprobó en los experimentos que realizamos en Orsay con el fin de desentrañar los mecanismos que determinan la polarización de espín y la magnetorresistencia en uniones túnel magnéticas.

Guiados por tal propósito, preparamos uniones túnel que tenían siempre los mismos electrodos (manganita y cobalto), aunque barreras distintas: titanato de estroncio ($SrTiO_3$), lantanato de cerio ($Ce_{0,69}La_{0,31}O_{1,85}$) y alúmina ($Al_2O_3$). Escogimos la manganita $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$ porque, conocida su elevada polarización de espín positiva, podía servir, en una unión túnel, de analizador de la polarización de espín del segundo electrodo, en este caso cobalto.

Investigamos la polarización de espín del cobalto con distintas barreras aislantes. Para hacer crecer las uniones, empezamos por depositar sobre sustratos de titanato de estroncio la manganita, aplicando la técnica de ablación láser. Por ese mismo método se depositan las barreras de titanato de estroncio y de lantanato de cerio. La barrera de alúmina se va constituyendo mediante pulverización catódica, lo mismo que el electrodo superior de cobalto; para blindar el conjunto se pulveriza con oro.

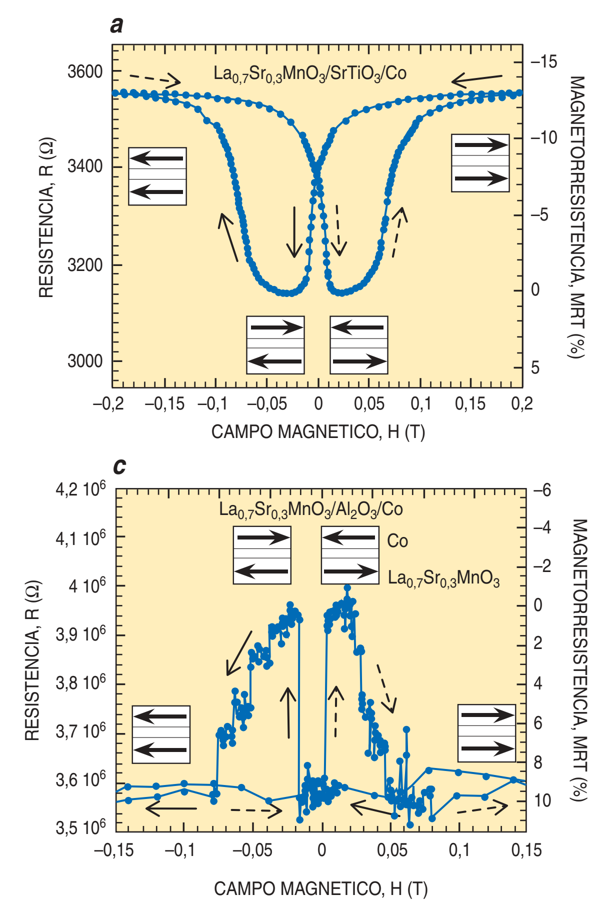
Como muestran las mediciones de microscopía TEM, la creación de las uniones procede capa a capa; así se logran interfaces electrodo/barrera continuas, homogéneas y muy poco rugosas, condiciones imprescindibles para obtener buenas propiedades de magnetorresistencia.

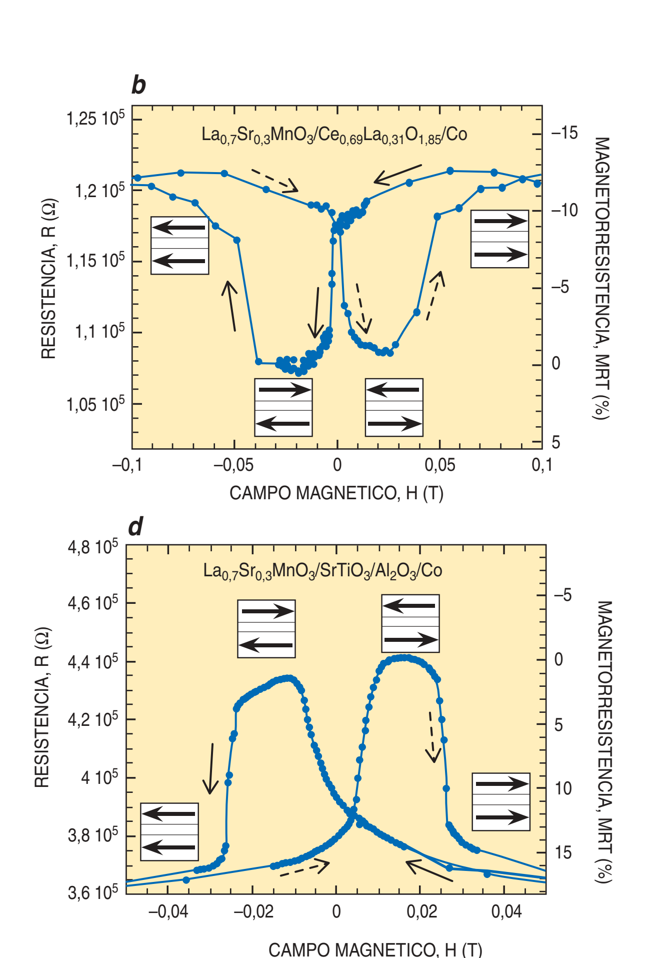
Una vez formado el emparedado, se acomete el proceso de litografía óptica para definir uniones túnel de diámetro entre 10 y 50 micrometros. Se realizan entonces los contactos eléctricos para efectuar las medidas de magnetorresistencia. Si la barrera no desempeñase ningún papel importante en el efecto túnel dependiente del espín, deberíamos observar que las curvas de magnetorresistencia eran siempre similares. Pero no vimos eso. Con una barrera de titanato de estroncio o lantanato de cerio, la resistencia de la unión era menor si los electrodos tenían imanaciones antiparalelas entre sí que cuando éstas se hallaban paralelas; con barreras de alúmina ocurría lo contrario, es decir, la resistencia era menor cuando las imanaciones de los electrodos estaban alineadas paralelamente entre sí.

Al fenómeno observado con las barreras de titanato de estroncio o lantanato de cerio, hasta entonces desconocido, lo denominamos “magnetorresistencia túnel inversa”. Entendemos que lo que acontece es que el signo de la polarización de espín es diferente para ambos electrodos. Como sabemos que la manganita posee siempre una polarización de espín positiva, la del cobalto tiene que ser negativa en ese tipo de uniones.

En el caso de las barreras de alúmina, atribuimos la resistencia menor en la configuración magnética paralela (“magnetorresistencia túnel normal”) a la polarización de espín positiva del cobalto en ese tipo de unión. Por tanto, según el tipo de barrera, difiere la polarización de espín del cobalto, positiva con alúmina y negativa con titanato de estroncio o lantanato de cerio.

Con nuestros experimentos adquieren sentido los resultados de Tedrow y Meservey sobre la polarización de espín, que parecían contradecir los cálculos teóricos sobre el llenado de las bandas electrónicas en materiales como el cobalto. En breve, no existe una única polarización de espín para un metal de transición en una unión túnel, sino que la polarización depende de la barrera utilizada; en consecuencia, la magnetorresistencia túnel se verá afectada por la barrera.





8. RESISTENCIA en función del campo magnético de cuatro uniones túnel que tenían los mismos electrodos (cobalto y manganita) y distintas barreras (titanato de estroncio, lantanato de cerio, alúmina y doble barrera titanato de estroncio/alúmina). Cuando la parte de la barrera en contacto con el cobalto es la alúmina, la resistencia en la configuración paralela de las imanaciones de los electrodos resulta menor que en la configuración antiparalela. Si el cobalto está en contacto con titanato de estroncio o lantanato de cerio, ocurre lo contrario. Por tanto, la barrera aislante desempeña un papel activo en la magnetorresistencia túnel a través de efectos de interfaz metal de transición/barrera.

Para ahondar un poco más en los posibles mecanismos responsables de estos efectos, preparamos una unión túnel con una doble barrera: $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3/SrTiO_3/Al_2O_3/Co$. Nos proponíamos ahora dilucidar la importancia específica del interfaz cobalto/barrera y de la segunda parte de la barrera. Y observamos una magnetorresistencia “normal”, como cabía esperar de una barrera exclusiva de alúmina. Tal resultado nos indica que la polarización de espín parece estar determinada por el interfaz cobalto/barrera, cuya magnitud y signo se deben a algún tipo de proceso que se produce allí.

De acuerdo con la observación experimental, un interfaz cobalto/alúmina tiene una polarización de espín positiva, mientras que un interfaz cobalto/titanato de estroncio o lantanato de cerio presenta una polarización de espín negativa. ¿Por qué?

En los metales de transición —el cobalto lo es— existen dos tipos de electrones con la energía propia del nivel de Fermi: los electrones que provienen de bandas de carácter “d”, que poseen una polarización de espín negativa, y los que provienen de bandas de carácter “s”, que poseen una polarización de espín positiva. En razón del tipo de interfaz, se privilegia que uno de los dos tipos de electrones proporcione la corriente túnel: los “s” en el caso de un interfaz cobalto/alúmina y los “d” en el caso de un interfaz cobalto/titanato de estroncio o lantanato de cerio.

Esta interpretación que damos del fenómeno resulta coherente con la dependencia de la magnetorresistencia respecto del voltaje aplicado, que es distinta en ambos tipos de interfaces. Algunos cálculos teóricos realizados por los grupos de Peter Levy y E. Yu Tsymbal, apuntan al tipo de enlace en el interfaz metal de transición/barrera, que puede ser decisivo a la hora de establecer qué electrones participan mayoritariamente en el efecto túnel y cuál es su polarización de espín.

Puesto que la precisión de los cálculos teóricos queda condicionada por la capacidad limitada de nuestros ordenadores, las predicciones cuantitativas resultan arriesgadas. Se va poco a poco profundizando en la comprensión del fenómeno del efecto túnel dependiente del espín en materiales sólidos, pero aún nos encontramos lejos de un conocimiento pleno del mismo. Téngase en cuenta que tratamos con materiales sólidos, formados por un número de partículas del orden del número de Avogadro (10^{23}), y trabajamos con aproximaciones, pues el problema de la interacción entre muchos cuerpos es matemáticamente irresoluble de un modo exacto.

En 1965 Gordon Moore predijo que, en cada nueva generación de chips de memoria y unidades de microprocesador, el tamaño del dispositivo se reduciría un 33 % y su capacidad se duplicaría. La “ley de Moore” se ha venido cumpliendo hasta la fecha. Se han incrementado en esa proporción el número de transistores por chip y la velocidad de los circuitos, hasta poder disfrutar de or-

denadores personales que trabajan a más de 1 gigahertz. El principal componente de estos microprocesadores es el transistor MOSFET (transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor), que consta de tres terminales y donde la corriente que fluye del primero (emisor) al segundo (colector) se controla mediante un voltaje aplicado al tercero (base). El óxido de silicio aislante evita el contacto eléctrico entre la base y los otros dos terminales. El espesor de esta película aislante es ahora de unos 25 átomos de silicio. La extrapolación de la ley de Moore a los próximos años sitúa, para el año 2012, el espesor de la película en 5 átomos de silicio. ¿Qué sucederá con la introducción del efecto túnel?

Hace algo más de un año, investigadores de Lucent Technologies informaban que con un espesor de 4 átomos de silicio, las funciones de onda de los electrones podían, por el efecto túnel, fluir a través de esta película de óxido hacia la base, destruyendo el aislamiento eléctrico y haciendo inoperante el transistor. Dicho de otro modo: para seguir progresando en la miniaturización de los circuitos integrados habrá que encontrar nuevas ideas que superen ese obstáculo o bien cambiar de técnica.

No es fácil prever hacia dónde evolucionará la electrónica. Sí estamos convencidos de la presencia del magnetismo a través de la electrónica de espín. Para el almacenamiento y lectura de la información, el nanomagnetismo es una de las técnicas dominantes y quizás el mejor preparado para cumplir la predicción de Feynman. En cuanto al procesamiento de la información, tal vez estemos asistiendo al final de la era del silicio y veamos la introducción de otra técnica que no viole la ley de Moore. Contamos con un sólido aliado, un electrón con sus dos posibles direcciones de espín.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ROLE OF THE METAL-OXIDE INTERFACE IN DETERMINING THE SPIN POLARIZATION OF MAGNETIC TUNNEL JUNCTIONS. J. M. De Teresa, A. Barthélémy, A. Fert, J. P. Contour, F. Montaigne, P. Seneor, en *Science*, vol. 286, p. 507-509, 1999.

MAGNETISM BEYOND 2000. Número especial de la revista *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 200, octubre 1999.

TALLER Y LABORATORIO

Shawn Carlson

Construcción de un telescopio de rayos cósmicos

Protones energéticos procedentes del espacio bombardean las capas superiores de la atmósfera donde chocan con átomos. Tales colisiones producen minúsculas explosiones atómicas, de las que brotan partículas de todas las especies del zoo corpuscular: protones, neutrones, electrones, muones o partículas lambda. De ellas, sólo los muones poseen una energía de penetración suficiente para llegar hasta el suelo indemnes. Ello no obstante, el flujo de rayos cósmicos, así se denominan tales partículas subatómicas, es bastante alto; cada segundo caen del orden de 200 por metro cuadrado terrestre.

Con el instrumento que aquí se describe, podremos observar la intensidad de los rayos cósmicos a lo largo del día, cartografiar su distribución sobre el firmamento y averiguar algunas peculiaridades de sus energías. El detector se compone de dos contadores Geiger, planos y de gran tamaño, enlazados mediante un sencillo circuito electrónico. Veamos cómo funciona. Un conjunto de alambres conductores finos soportan unos 1000 volt. Ese potencial crea un campo eléctrico muy intenso (más de un millón de volt por metro) junto a cada conductor. Cuando en ese espacio penetra un rayo cósmico, éste despoja de unos pocos electrones a algunos átomos del gas circundante, electrones que buscan el conductor dotado de carga positiva más próximo. Por el camino, esos electrones ganan suficiente energía a costa del campo eléctrico para desprender más electrones de otros átomos del gas. Esas cargas se aceleran también y chocan liberando aún más electrones.

En millonésimas de segundo, los pocos electrones liberados al principio por el paso del rayo cósmico desencadenan un alud eléctrico, haciendo que sobre el conductor caiga una cascada de más de mil millones de cargas negativas. Esa corriente entra en un condensador (*C1 en la figura 2*), lo que a su vez genera un impulso de tensión que cursa hacia el circuito contador.

La mayoría de los contadores Geiger se rellenan con un gas noble, helio o argón por lo común, que hallaremos en las tiendas de artículos para soldadura. Sirve también el aire ordinario, pero con una tensión de funcionamiento más elevada.

1. Cuatro cuadrados de plástico y un poco de alambre preparados para construir una cámara de vacío plana

Cualquiera que sea el gas empleado, hay que reducir la presión en la cámara a unos siete centímetros de mercurio, un 10 % de la presión atmosférica. En diciembre de 1996 describíamos una bomba de vacío de factura casera que nos puede valer. La presión en la cámara puede también reducirse con una bomba de bicicleta adecuadamente modificada.

Para empezar la construcción cortaremos cuatro piezas como las que se muestran de una placa de plástico de un centímetro de grosor. Con el filo de una lima practíquense una serie de pequeñas muescas espaciadas exactamente medio centímetro sobre cantos opuestos de la pieza, según se indica en el diagrama. Dispóngase luego un trozo de "alambre colector" grueso (alambre de cobre macizo sin aislante). Se sujeta con cinta aislante en las esquinas y se aplican gotitas de epoxia rápida (de cinco minutos) entre las muescas. Además, se añadirá una cantidad generosa de epoxia al alambre a lo largo del canto no limado, asegurándose de dejar sin tocar al menos un centímetro alrededor del perímetro para acomodar la pieza que encaja encima.

Empléense las muescas para situar el "alambre sensor", de cobre desnudo y de 250 micras de grueso. Hay que devanar el alambre sobre el bastidor de plástico cuadrado, con gran cuidado en mantener una mano inmóvil para que la tracción sea constante, cuyos extremos sujetaremos con cinta de fontanero.

A continuación, el alambre sensor debe estañosoldarse al alambre colector en todos los puntos en que es-

tén en contacto. Se empleará un hierro de soldar caliente y mucho fundente. Después, se sujeta el alambre sensor al bastidor cubriéndolo generosamente de epoxia lenta (de 24 horas). Secada ésta, recórtese con unas tijeras el exceso de alambre justo donde éste emerja de la epoxia para quedarse con un plano de 29 alambres sensores. Al alambre colector se suelda un cable de alta tensión.

Con epoxia se pega pan de aluminio a los cuadrados superior e inferior, y se montan la llave de paso y el vacuómetro en la pieza superior. Al pan de aluminio se sueldan cables de masa. En las piezas centrales se abren tres regatas estrechas para los cables de alta tensión y de masa (con un taladro nos arreglaremos).

Ya podemos ensamblar la cámara. Esta debe ser estanca al aire, por lo que se depositará un cordón continuo de pegamento de silicona para acuarios a lo largo de las junturas de las capas y encima del conjunto se pondrá un buen peso o se pinzará el conjunto con abrazaderas o tornillos de banco hasta que se seque el adhesivo. Hay que asegurarse especialmente de la hermeticidad de las regatas por donde pasan los cables.

El altavoz proporciona una salida audible, mas para mayor precisión yo cuento los rayos cósmicos con un pedómetro digital adquirido por 15 dólares a Radio Shack (número de catálogo, 63-618). Cuando este dispositivo es empujado lo suficiente para que su péndulo imantado se incline hacia un lado, el imán pone en contacto dos tiras metálicas delgadas situadas dentro de un conmutador encapsulado, cerrándose un circuito. Derivando ese conmutador con otro propio, lograremos que el pedómetro cuente cualquier cosa representada por eventos no demasiado frecuentes. El límite parece estar situado en torno a las cinco veces por segundo, lo que se ajusta bien al conteo de rayos cósmicos.

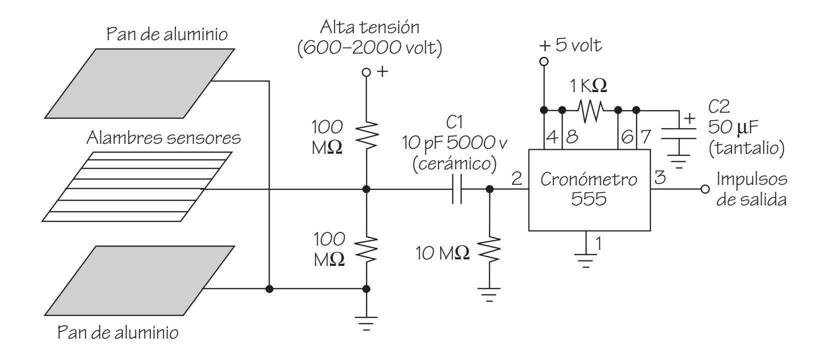
Para transformar el pedómetro, quítese la tapa de la batería y, con unos alicates, practíquese una mordedura en el costado derecho de su caja de plástico. Puesto el conmutador al descubierto, se saca cortando y se sueldan los cables procedentes del circuito detector.

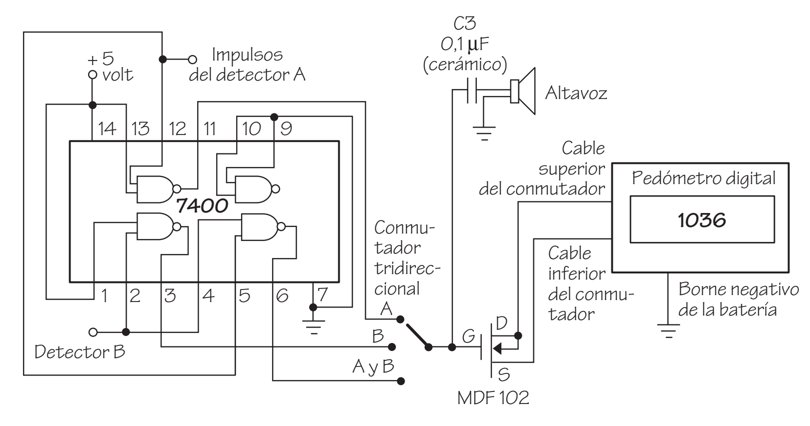
Para que funcione el aparato hace falta una fuente de alimentación de alta tensión. Antes de ponerlo en marcha, hay que asegurarse de que no hay al descubierto conductores de alta tensión y se extremarán los cuidados para evitar sacudidas peligrosas. Una vez seguros de la ausencia de peligro, aplíquense 600 volt para empezar y elévese lentamente el potencial hasta que comience a registrar el recuento. Esa será la tensión umbral de nuestra cámara. La velocidad de recuento subirá con el potencial aplicado hasta que se detecten prácticamente todas las partículas ionizantes que penetren en la cámara. En ese punto (1200 volt en mi detector), la velocidad de recuento adquiere un nivel constante. La "meseta" en cuestión debe abarcar varios centenares de volt. Al aumentar la tensión, unos efectos secundarios originan recuentos espurios, motivo por el cual se aviva de nuevo la velocidad de recuento. La tensión de funcionamiento se ajusta en el centro de la meseta.

Una vez preparadas y ensayadas dos cámaras iguales, es fácil construir un telescopio de rayos cósmicos. Se alinean las dos cámaras y se pone el conmutador en la posición A-y-B, que cuenta los eventos que activan ambos detectores. Como las partículas producidas por la desintegración radiactiva carecen de energía suficiente para atravesar ambas cajas de plástico, el telescopio sólo revelará ya rayos cósmicos.

Nuestro equipo brinda numerosas oportunidades para la investigación. Para detectar las variaciones diarias y estacionales del flujo de rayos cósmicos, colóquense las cámaras muy próximas entre sí. O bien sepárense para limitar la aceptación angular del telescopio. Esta maniobra nos permite medir el flujo procedente de una dirección dada y observar de qué modo la velocidad depende del ángulo de elevación y del azimut.

Poniendo materia entre las dos cámaras, pueden barrerse los rayos cósmicos de baja energía. Los muones pierden unos dos millones de electronvolt (MeV) de energía por cada centímetro de agua que atraviesan. Un ladrillo, cuya densidad viene a doblar la del agua, extraerá unos 4 MeV por cada centímetro de grosor. Puede aprovecharse este efecto para investigar el espectro energético de los muones más débiles incidentes en nuestro detector. Y pueden detectarse las inmensas "duchas cósmicas" que generan los protones muy energéticos, comparando los resultados procedentes de dos telescopios separados unos cien metros. Con algo de imaginación, cualquiera puede realizar descubrimientos fascinantes.





2. Una fuente de alta tensión y un sencillo circuito detectan el paso de las partículas de radiación cósmica

Hasta enero de 2002 la Society for Amateur Scientists ofrece un kit con los componentes electrónicos necesarios (aparte del pedómetro) y un carrete de hilo detector fino. Su precio es de 30 dólares. Pídase a la sociedad, teléfono 401-823.78.00.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

La Pascua es cuasi-cristalina

Dediqué mi primer artículo de Juegos Matemáticos, hace 10 años, al "Teorema navideño" de Fermat. Estamos ahora en Cuaresma y parece oportuno dedicar este nonagesimosexto y penúltimo de mis artículos a la Pascua de Resurrección.

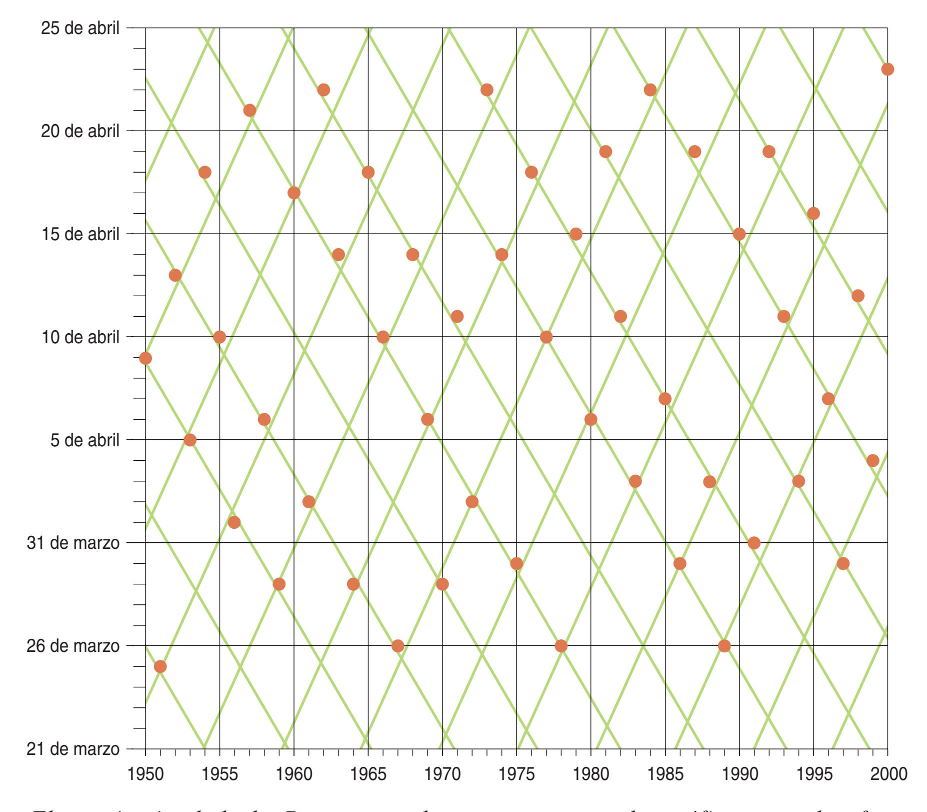
La Navidad se celebra siempre el 25 de diciembre, pero la fecha de la Pascua es harina de otro costal. Esta festividad puede caer entre el 22 de marzo y el 25 de abril, un intervalo de cinco semanas. La fecha cambia de un año a otro por una serie de motivos. Ante todo, ha de ser domingo, porque la Crucifixión tuvo lugar en viernes, y la Resurrección, en domingo. Por otra parte, el Nuevo Testamento dice que la Crucifixión tuvo lugar durante la fiesta de la Pascua judía, que se celebra durante los ocho días consecutivos a la primera luna llena de primavera.

La fecha de la Pascua está, pues, ligada a varios ciclos astronómicos, y aquí es donde surgen las dificultades. El mes lunar tiene en la actualidad una duración de unos 29,53 días, y el año solar, unos 365,24 días. Un año solar equivale, por tanto, a unos 12,37 meses lunares por año, relación incómoda de manejar, al no ser entera. Sucede así que 235 meses lunares suman muy aproximadamente 19 años solares, hecho en que se funda el sistema eclesiástico de asignación de fechas a la Pascua. En el concilio de Nicea, en el año 325, los obispos decidieron que la Pascua debería caer en el primer domingo siguiente a la primera luna llena posterior al equinoccio de primavera (fecha del mes de marzo en el que la noche y el día tienen la misma duración).

Por entonces, el año estaba basado en el calendario juliano, que tenía un año bisiesto cada cuatro. Se suponía que las fechas de las lunas llenas se repetían cada 19 años julianos; con algún pequeño retoque en el calendario, dicho período equivalía a 235 meses lunares. Este período de 19 años era conocido por ciclo lunar, y la posición de cada año en el ciclo estaba indicada por su Número Aureo, que iba de 1 a 19. El ciclo completo del calendario juliano habría de repetirse cada 76 años: tras cuatro ciclos lunares de 19 años cada uno, la pauta de años bisiestos se repetía. El principio matemático correspondiente es que el período de un ciclo es igual al mínimo común múltiplo de los períodos de los subciclos que lo constituyen (76 es el mínimo común múltiplo de 19 y de 4).

Las fechas de la Pascua se repetían en un ciclo de 532 años, porque 532 es el mínimo común múltiplo de 76 (el ciclo del calendario juliano) y 7 (ciclo de días en la semana). Era un sistema pulcro; pero no tenía exactamente en cuenta las verdaderas duraciones del mes lunar y del año solar. Con el paso de los siglos, el calendario empezó a mostrar desfases con respecto a las estaciones. (Dante Alighieri, el poeta medieval italiano, señaló que el mes de enero acabaría por no ser parte del invierno.) Por fin, en 1582, el Papa Gregorio XIII reformó el calendario, omitiendo el día bisiesto en todos los años que fueran múltiplos de 100, exceptuados los que fueran múltiplos de 400 (como el 2000, por ejemplo). Para corregir el desfase acumulado, el calendario gregoriano de 1582 se saltó los 10 días que iban del 4 al 15 de octubre.

El nuevo procedimiento de la Iglesia para calcular la fecha de la Pascua le asignaba a cada año un número llamado Epact, que es un entero comprendido entre 0 y 29. Este número expresa en qué fase se encuentra la Luna el 1 de enero de cada año, con



El cuasi-cristal de la Pascua se obtuvo representando gráficamente las fechas de esta festividad desde el año 1950 al 2000. La gráfica evoca un retículo regular (en verde)*, aunque los puntos de la representación* (en naranja) *se apartan un poco de las intersecciones del retículo, análogamente a los átomos de un cuasi-cristal*

Cálculo de la Pascua de Resurrección

Tómese un año cualquiera del calendario gregoriano, al que llamaremos *x*. Para determinar la fecha de la Pascua se efectúan los 10 siguientes cálculos (sencillos de programar en un ordenador):

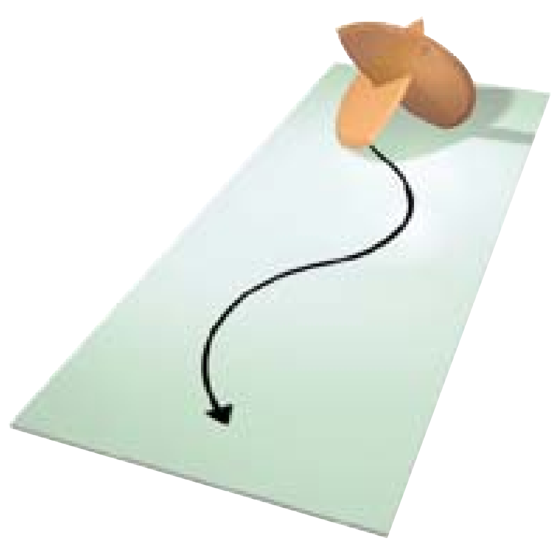
1. Se divide *x* entre 19; se obtienen un cociente (que se desprecia) y un resto A. Este número A define la posición del año en el ciclo lunar, que tiene 19 años (A + 1 es el Número Aureo del año).
2. Se divide *x* entre 100, lo que da un cociente B y un resto C.
3. Se divide B entre 4; sean D el cociente, y E, el resto.
4. Se divide 8B + 13 entre 25; se obtiene un cociente G y un resto (que se desprecia).
5. Se divide 19A + B – D – G + 15 entre 30; se desprecia el cociente y se conserva el resto, H. (El Epact del año es 23 – H cuando H es menor que 24, y 53 – H si no es así.)
6. Se divide A + 11H entre 319; se guarda el cociente, M, y se desprecia el resto.
7. Se divide C entre 4, lo que da un cociente J y un resto K.
8. Se divide 2E + 2J – K – H + M + 32 entre 7. Se desprecia el cociente y se conserva el resto, L.
9. Se divide H – M + L + 90 entre 25; se tiene un cociente N y un resto (que se desprecia).
10. Se divide H – M + L + N + 19 entre 32; se desprecia el cociente y se guarda el resto, P.

El Domingo de Resurrección es el P-ésimo día del N-ésimo mes (N puede ser 3 o 4 para marzo, y 4 para abril). La letra dominical del año se puede calcular dividiendo 2E + 2J – K entre 7 y tomando el resto (el resto 0 equivale a la letra A, el 1, a la B, y así sucesivamente).

Verifiquemos el procedimiento en el caso *x* = 2001: (1) A = 6; (2) B = 20, C = 1; (3) D = 5, E = 0; (4) G = 6; (5) H = 18; (6) M = 0; (7) J = 0, K = 1; (8) L = 6; (9) N = 4; (10) P = 15. Así pues, la Pascua de 2001 es el 15 de abril.

el convenio de que 0 representa a la luna nueva, y 15 a la luna llena. El ciclo de Epacts ha de ser revisado de vez en cuando, para tener en cuenta que 235 meses lunares no equivalen exactamente a 19 años solares. La última de tales correcciones aconteció en 1900, y será necesario efectuar la próxima en el 2200.

Utilizando el Número Aureo y el Epact correspondiente a un año dado cualquiera, podemos calcular la fecha de la primera luna llena de primavera. Para determinar la fecha de la Pascua —el primer domingo siguiente a la luna llena— la Iglesia asignó a cada año un año dominical, desde la A hasta la G, que indica la fecha del primer domingo de ese año: A para el 1 de enero, B para el 2 de enero, y así sucesivamente. Cada año bisiesto tiene dos letras dominicales, una para enero y febrero, y otra para los demás meses.



El sistema no carece de deficiencias. La Iglesia considera que el 21 de marzo es la fecha perpetua del equinoccio vernal, pero el equinoccio astronómico auténtico puede producirse ya el 19 de marzo (así ocurrirá en 2096). Tampoco la Luna se atiene a convenios jurídicos. En 1845 y 1923, en las longitudes más orientales de la Tierra, la primera luna llena de primavera tuvo lugar después del Domingo de Resurrección.

El matemático alemán Carl Friedrich Gauss inventó en 1800 un sencillo algoritmo que incorporaba las reglas de la Iglesia para el cálculo de la Pascua. Desdichadamente, el trabajo de Gauss incurría en un pecado leve: daba como fecha de la Pascua correspondiente al año 4200 el 13 de abril, cuando debería ser la del 20 de abril. El mismo corrigió de su mano el error en su ejemplar del artículo publicado. El primer algoritmo impecable fue publicado en 1876 en la revista *Nature*; su autor, un estadounidense anónimo. En 1965, Thomas H. O'Beirne, de la Universidad de Glasgow, publicó dos de tales procedimientos en su libro *Puzzles and Paradoxes*. El método de O'Beirne, sitúa los diversos ciclos y ajustes en un esquema aritmético.

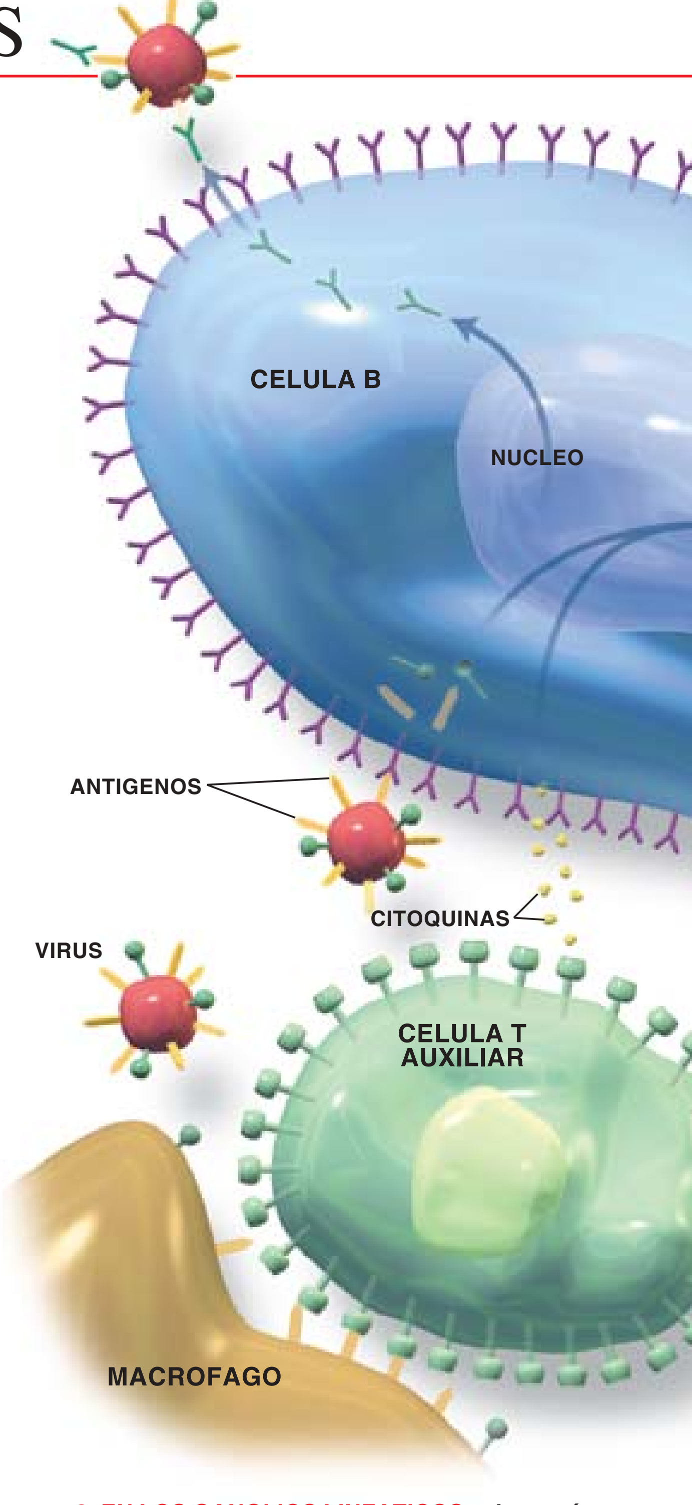
En términos generales, la fecha de la Pascua se va retrasando unos 8 días cada año, hasta que súbitamente salta de nuevo hacia adelante. La pauta parece irregular, pero en realidad se atiene al procedimiento aritmético recién descrito. En 1990, Alan Mackay, cristalógrafo de la Universidad de Londres, se dio cuenta de que este deslizamiento cuasi-regular debería quedar a la vista en un gráfico que comparase la fecha de la Pascua con el número del año. El resultado es un retículo aproximadamente regular, como la disposición de los átomos en un cristal.

Sin embargo, las peculiaridades del calendario hacen que las fechas varíen ligeramente con respecto al retículo. El gráfico hace pensar más bien en un cuasi-cristal, una estructura molecular construida en los primeros años ochenta del siglo pasado. Aunque los cuasi-cristales no presentan la regularidad de los cristales, la distribución de sus átomos dista de ser aleatoria. La estructura es similar a la de una curiosa clase de teselaciones descubierta por Roger Penrose, físico de Oxford; tales teselaciones recubren el plano sin repetición periódica de un mismo patrón. Los átomos de los cuasi-cristales presentan una regularidad similar, lo mismo que las fechas de la Pascua. La festividad es cuasi-cristalina en el tiempo, en vez de serlo en el espacio.

Con las reglas del calendario gregoriano, el ciclo de fechas de la Pascua se repite exactamente cada 5.700.000 años. Empero, mucho antes de la primera repetición, las reglas se habrán desfasado con respecto a la realidad astronómica: las duraciones del mes y del día están cambiando lentamente, a causa, sobre todo, de la fricción de las mareas. Por puro entretenimiento, trate de calcular la fecha de la Pascua correspondiente al año 1.000.000.

Ideas aplicadas

Mark Fischetti



Vacuna antigripal

Cada año la gripe contribuye a la muerte de millones de personas en todo el mundo. El virus penetra en nuestro cuerpo a lomos de una gota de agua inhalada, luego se abre paso hasta las células, se replica e invade otras células. Nuestro sistema inmunitario puede perseguir, acorralar y matar a esos microorganismos, pero tarda una semana o más. En su expansión, el virus puede doblegar a una persona cuyo sistema inmunitario no reaccione con suficiente vigor o rapidez, provocándole una neumonía u otras complicaciones.

La vacunación ofrece al sistema inmunitario un ejercicio de entrenamiento para aprender a montar un rápido contraataque. Como el virus muta regularmente, hay que elaborar una vacuna nueva para cada temporada. Durante cada invierno, la Organización Mundial de la Salud recomienda tres cepas de gripe para el cóctel del año siguiente, basándose en las cepas que se van manifestando. La administración sanitaria de cada país abastece de reservas víricas a las empresas farmacéuticas. Esas empresas inoculan el material en huevos de gallina fecundados, donde se replica. Cada cepa la cultivan por separado y le extraen fluido alantoideo (clara de huevo) para cosechar el virus, purificarlo, inactivarlo, mezclar las cepas con un fluido de transporte y distribuirlo en viales.

La eficacia de la vacuna gripal es sólo del 70 al 90 por ciento en los adultos sanos y algo inferior en otros individuos. Mientras que la vacuna gripal protege únicamente durante un año, otras vacunas (antipoliomielitis, contra el sarampión) perduran durante años. Para algunas enfermedades (tétanos, hepatitis B), las vacunaciones de refuerzo alargan la inmunidad mediante exposiciones adicionales.

1. INYECCION de una forma inactiva del virus de la gripe. Los macrófagos y las células dendríticas, las fuerzas de choque del sistema inmunitario, transportan los antígenos del intruso a los ganglios linfáticos.

2. EN LOS GANGLIOS LINFATICOS, a los antígenos del virus se enlazan células linfocíticas B que determinan las características del invasor. Mientras, células linfocíticas T auxiliares se enlazan con los antígenos gripales desplegados en los macrófagos. Los linfocitos envían citoquinas (señales químicas) que ayudan a las células B a instruir a sus núcleos para que activen a los genes productores de los anticuerpos propios del virus. Las células B liberan los anticuerpos y éstos se unen a los antígenos del virus para bloquearlos e impedir que el virus infecte las células y se replique.

MACROFAGO

TOXINAS

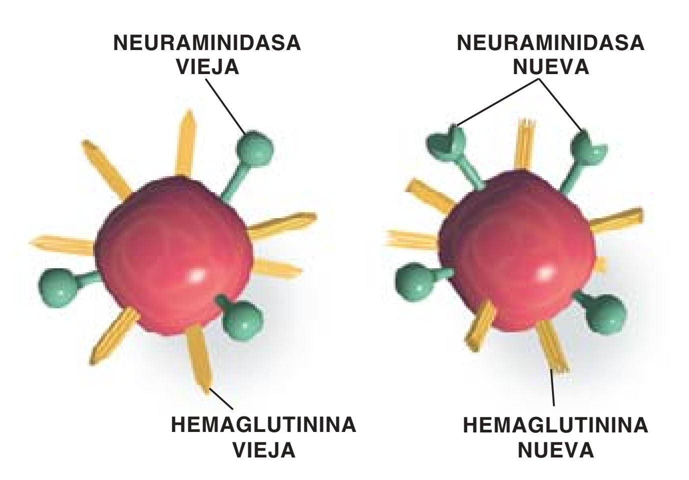
ENZIMAS

3. UN MACROFAGO localiza un virus cubierto de anticuerpo y lo engloba. Luego produce toxinas para matarlo o lo digiere con enzimas. Como el virus gripal inyectado estaba inactivado, no plantea amenaza morbosa alguna, pero su presencia basta para hacer que el sistema inmunitario aprenda a generar los anticuerpos correctos. Si posteriormente se inhala un virus vivo, los anticuerpos restantes pondrán coto a los invasores y las células B y T, ya entrenadas, lanzarán más anticuerpos.

VIRUS INACTIVO

ANTICUERPO

4. EL VIRUS DE LA GRIPE supone una amenaza cada año porque altera regularmente sus antígenos, llamados hemaglutinina (HA) y neuraminidasa (NA). Por tanto, las células B y T entrenadas por una vacuna anterior no se enlazan bien con él. En la mayoría de los años, mutaciones graduales en el ARN del virus crean discretos cambios en la HA o NA, proceso llamado "deriva" antigénica. A veces, no obstante, distintos virus intercambian material genético. Esta "deriva" antigénica altera drásticamente el ARN, creando un nuevo subtipo de gripe con unas HA o NA diferentes que requiere una fórmula de vacunación de nuevo cuño.



¿Sabía usted que...?

- **GENES ASESINOS:** Sólo en EE.UU. la gripe es responsable de 110.000 hospitalizaciones y la pérdida de 70 millones de jornadas laborales al año. En tres ocasiones a lo largo del siglo pasado, se produjeron variaciones bruscas y extremas en los genes del virus que sorprendieron a los funcionarios de sanidad y causaron pandemias globales. La "gripe española" de 1918 mató a 20 millones en todo el mundo. La "gripe asiática" de 1957 mató a 70.000 norteamericanos y a 34.000 la "gripe de Hong Kong" de 1968. Las cepas de Hong Kong, aún no conocidas del todo, han producido desde entonces más de 400.000 defunciones en EE.UU., el 90 por ciento entre personas de 65 años y más.

- **REAPARICION:** Están retornando enfermedades infantiles que se suponían erradicadas. Cada vez más padres, demasiado preocupados por el posible peligro de las vacunas, rechazan inmunizar a sus hijos. Actualmente menos del 50 por ciento de los niños norteamericanos reciben la dieta completa de las vacunas recomendadas. En 1998 hubo en EE.UU. más de 7400 casos de tos ferina, 660 casos de paperas y 460 casos de sarampión.

- **ALTERNATIVAS:** Aviron, empresa farmacéutica de Mountain View (California), ha terminado la fase III de los ensayos de una vacuna con virus de vida atenuada, un aerosol que se inhala y de administración más sencilla que una inyección. A finales de noviembre de 2000 el departamento de bromatología y farmacología norteamericano informó que durante un brote epidémico, dosis diarias de Tamiflu, una píldora de Hoffman-La Roche recetada para aliviar los síntomas gripales en los adultos, podría prevenir la contracción de la enfermedad casi tan bien como una vacuna. No obstante, el departamento de bromatología y farmacología afirma que la vacuna es la mejor prevención general.

Nexos

James Burke

De vuelta a casa



Hace tiempo revisé la biografía de Anne Home, quien se casó con John Hunter, un carpintero del siglo XVIII convertido en cirujano patólogo y patrón de los ladrones de tumbas. Anne era una poetisa menor que escribió textos a los que Haydn puso música (una pieza notable fue: "Mi madre me dice que me recoja el pelo") y que era conocida por celebrar reuniones literarias (en cierta ocasión, un exasperado Hunter los echó a todos de casa).

En 1792 un viejo conocido de ella les recomendó a un guapo joven de diecisiete años para un aprendizaje gratuito: esbozar el trabajo de Hunter (fragmentos de piezas, por decirlo de alguna manera) y poner orden en la creciente confusión de recuerdos anatómicos que Hunter había ido almacenando en la trastienda. Esta aglomeración se convertiría en la famosa colección Hunter, de la que el mozo agraciado, William Clift, se haría cargo a la muerte de Hunter en 1793 y durante más de 50 años, se dice que día y noche. Clift se convirtió en la infatigable fuente de investigación de la colección para lumbreras como Cuvier, Lyell, Davy y Banks, así como en una enciclopedia andante sobre cualquier aspecto relacionado con la anatomía.

Visto lo cual sorprende que le quedara tiempo para casarse y tener una hija, Carolina Amelia. Cuando le tocó el turno, otro joven bien plantado llegó a convertirse en ayudante de Clift, y Caroline se casó con él en 1835. El marido reciente y genio de la anatomía, Richard Owen, ya había aparecido tres años antes en la escena científica con una divertida "Memoria de *Pearly Nautilus*", para adentrarse en el estudio de los moluscos, ámbito demasiado misterioso para mí como para tenerlo en cuenta. No así para otros. Poco después de asumir todos los asuntos de la colección que le traspasó Clift, Owen fue catapultado a la fama y al departamento de historia natural del Museo Británico. Allí su dinamismo explotó como una bomba entre los funcionarios, razón por la cual no queda ni rastro.

Owen consiguió su lugar propio, después de diseñarlo él mismo y de montar tal alboroto, que el gobierno dispuso parte de los beneficios obtenidos por la exposición del Palacio de Cristal en 1851 para subvencionar su Museo de Historia Natural de South Kensington, construido ex profeso y que abrió sus puertas al público en 1881. Un edificio victoriano-polícromo-pseudobarroco-*Rhineland-Romanesque* no es exactamente lo que uno espera encontrarse construido de intento, pero no está mal si a uno le gusta el desorden arquitectónico. Como es de imaginar, Owen era un tipo inquieto que conocía a todo el mundo, lo diseccionaba todo (desde el mapache hasta el gato), atacó la teoría darwinista de forma anónima y devino tan popular, que la reina le concedió un título nobiliario y una mansión donde vivir.

Era la persona apropiada a quien consultar para escribir un éxito de ventas sobre "Misiones e investigaciones en Sudáfrica". En 1857 fraguó la fama autobiográfica (de la miseria a la riqueza) de un misionero compañero de Owen, que pasó quince años acosado por los leones, devorado por las fiebres y llegando donde nunca antes habían visto a un hombre blanco, para llevar el Evangelio allende tierras británicas, al Africa más oscura. Volvió convertido en héroe nacional en 1856.

Antes de su segundo viaje a la jungla (entre 1858 y 1864, esta vez más por mor de explorar que de evangelizar), David Livingstone estaba destinado a desarrollar severas hemorroides sin percatarse de ello. Es probable que debido a las mismas su tercer viaje (1866) resultara fatal. Durante esta su última aventura, luego de tres años sin noticias suyas, los rumores volaban en su casa: que si había muerto, que si no había muerto, que si se lo habían comido, que si no volvería jamás. Vivo o muerto, había osado ir donde nunca antes había pisado un europeo, y el público no podía esperar a descubrir cómo acabaría la historia. Algo muy apropiado para vender un montón de periódicos.

Así que, en 1869, el sensacionalista *New York Herald* contrató los servicios de alguien que fuera en busca de Livingstone. El elegido fue Henry Morton Stanley, cuyo verdadero nombre era John Rowlands, un remero galés (apadrinado por la familia Stanley de Nueva Orleans) que cambió de bando durante la Guerra Civil, antes de desertar de la Marina estadounidense y convertirse definitivamente en (no podía ser de otra manera) periodista. Stanley encontró a su hombre. "El Dr. Livingstone, supongo", según la tradición (pero, ¿quién si no él podía estar achicharrado por el sol en Ujiji, junto al Lago Tanganika, en octubre de 1871?).

Fue el segundo viaje de Stanley a Africa. En 1868 ganó fama informando de lo que sucedía en Magdala, Etiopía, donde los nativos habían tenido el atrevimiento de encerrar a algunos ingleses en la cárcel. Ello dio pie a la llegada de 13.000 hombres de las tropas del destacamento británico, arropado por artillería, bajo el mando del general Robert Napier (que liberó a los cautivos, arrasó Magdala y se marchó), y a quien una nación agradecida erigió entonces una estatua en la esquina

de mi dentista. Al inicio de su carrera, cuando en 1831 todavía era un joven teniente de ingenieros en Bengala, Napier se encontró en los montes Siwalik a los pies del Himalaya con un montón de tiempo libre, que ocupó buscando y dibujando fósiles. Le acompañó en sus excursiones Hugh Falconer, destinado a ser jefe de los jardines botánicos de Saharanpur. Además de labrarse una sólida reputación paleontológica (descubrió el mastodonte, sivaterios, tortugas gigantes y un largo etcétera), Falconer salvó al Imperio Británico al iniciar el programa de alto secreto por el que se lograría que el té se cultivara en la India (parte del imperio británico por aquel entonces), de similar calidad que el de China (que no era parte del imperio británico). El socio a quien Falconer sustituyó en los Jardines Botánicos de Saharanpur cuando el primero regresó a Inglaterra era J. F. Royle, famoso por su informe de 1839 en el que recomendaba la importación de plantones de quino de Sudamérica a la India para así poder salvar a la atribulada colonia de la falta urgente de quinina, obtenida de la corteza de aquel árbol y empleada para tratar el paludismo.

En Londres, el interés suscitado en el Real Jardín Botánico de Kew por el informe de Royle sobre la quina fue, con toda probabilidad, lo que arrinconó un plan presentado por Thomas Hancock y su socio Charles Macintosh para realizar una expedición (también a Sudamérica) que tenía por objeto el traslado de plantones, esta vez de caucho. En esa época, el caucho se importaba en barricas. Hancock había desarrollado un método de extracción del caucho para reciclar los restos derivados del manejo de tales recipientes. Macintosh descubrió en 1823 que un derivado de la brea de carbón, la nafta, podía disolver los jirones de caucho. Obtuvo así una pasta que extendió entre dos lienzos de tela para fabricar el primer chubasquero. Habida cuenta del tiempo que hace en Gran Bretaña, el invento estaba llamado a triunfar. Con los años, ambos alcanzarían fama y fortuna, pero sólo después de dar cuenta del problema de la quina sanadora.

Macintosh aprendió química en Edimburgo, de manos del gran Joseph Black (calor latente, dióxido de carbono, patrón y consejero de Watt en temas de vapor). Fue mentor de Black y profesor en el mismo establecimiento William Cullen (el de la descripción y clasificación de las enfermedades). Cullen contó también entre sus alumnos predilectos a George Fordyce, que entre tías y tíos sumaba diecinueve. Se graduó en 1758 con una disertación sobre la química del resfriado y acabó en Londres, en St. Thomas, donde años más tarde cofundaría una sociedad para el fomento del conocimiento médico y quirúrgico.

Sólo sé que en 1788 se distinguió con su medalla de oro a un antiguo cirujano de la marina por una elegante "Disertación sobre las propiedades del pus". Quién sabe si su autor (Everard Home) no recurrió a los trucos literarios de su poética hermana Anne.

LIBROS

Orbes

Cósmicos y terrestres

GLOBES AT GREENWICH. A CATALOGUE OF THE GLOBES AND ARMILARY SPHERES IN THE NATIONAL MARITIME MUSEUM. Dirigido por Elly Dekker. Oxford Universiy Press-The National Maritime Museum; Oxford, 1999. **WORLD-MAPS FOR FINDING THE DIRECTION AND DISTANCE TO MECCA. INNOVATION AND TRADITION IN ISLAMIC SCIENCE,** por David A. King. Brill; Leiden, 1999.

PRINCE HENRY "THE NAVIGATOR". A LIFE, por Peter Russell. Yale University Press; New Haven, 2000. **GEOGRAPHY, CARTOGRAPHY AND NAUTICAL SCIENCE IN THE RENAISSANCE,** por W.G.L. Randles. Variorum. Ashgate; Aldershot, 2000. **ASTRONOMY IN THE IBERIAN PENINSULA: ABRAHAM ZACUT AND THE TRANSITION FROM MANUSCRIPT TO PRINT,** por José Chabás y Bernard R. Goldstein. American Philosophical Society; Philadelphia, 2000. **IL COMPASSO DI FABRIZIO MORDENTE. PER LA STORIA DEL COMPASSO DI PROPORZIONE,** por Filippo Camerota. Leo S. Olschki; Florencia, 2000.

GEOGRAPHY AND ENLIGHTENMENT. Dirigido por David N. Livingstone y Charles W. J Withers. The University of Chicago Press; Chicago, 1999. **GEOGRAPHY UNBOUND. FRENCH GEOGRAPHIC SCIENCE FROM CASSINI TO HUMBOLDT,** por Anne Marie Claire Godlewska. The University of Chicago Press; Chicago, 1999.

ENCYCLOPEDIA OF ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS. Dirigida por Paul Murdin. Institute of Physics Publishing-Nature Publishing Group. Londres, 2000.

Mapas, cartas, tablas, compás, globos y esferas son productos del ingenio humano que despiden luz propia y permiten observar lo que la teoría —la visión mental, si nos atenemos a su etimología griega— se esfuerza en describir.

La técnica más antigua, la de los globos terráqueos y celestes, se pierde en la noche de los tiempos y llega a nuestros días (*Globes at Greenwich*). Subsidiaria, en un comienzo, de la filosofía natural, en ella el Renacimiento compendió su saber geográfico y astronómico en rápida expansión y la convirtió en instrumento de navegación y cosmografía. Su manufactura en yeso, madera o metal era compleja y laboriosa, por no hablar de la destreza requerida para su ilustración cabal. El Museo Marítimo Nacional de Greenwich conserva una de las colecciones más ricas y selectas de globos, esferas armilares y planisferios, catalogada por Elly Dekker.

Si hoy los globos cumplen la función de representar el mundo que nos rodea de una forma concisa, práctica y racional, con un alto grado de precisión cartográfica, en un comienzo servían, sobre todo, para indicar el tiempo y los acontecimientos relacionados con su transcurso, orto y ocaso solar, longitud del día y sucesión de las estaciones.

El globo expresa la imagen del cosmos o de la Tierra en el momento de su factura. De ahí su evolución de la mano del conocimiento y, sobre todo, de los descubrimientos geográficos. En la *Introducción a los fenómenos*, escrito por Geminus hace veinte siglos, se describen dos tipos de globos celestes: uno sólido y otro anular. El globo anular ilustraba la estructura geométrica del universo, definido por los círculos principales de una esfera imaginaria: la línea equinoccial, la eclíptica, los trópicos, los círculos "árticos" y el horizonte. Tal gavilla de círculos nacía de dos movimientos fundamentales, que hoy reconocemos como el de la Tierra en torno a su propio eje y su revolución en torno al Sol. Ambos movimientos conformaron la esfera armilar y los globos.

Para un astrónomo seguidor de Ptolomeo, la Tierra permanecía inmóvil en el centro del universo; a su alrededor se ordenaban la Luna, el Sol, los planetas y el firmamento estrellado. Del primer movimiento daba cuenta la esfera más externa, la del Primer Móvil, que ejercía un efecto cinético, es decir, impulsaba una rotación en poco menos de 24 horas de este a oeste en torno a lo que se suponía el eje del universo. Una vez establecida la ubicación de un punto de la Tierra con respecto a los polos del universo (o la localización del eje del universo con respecto al horizonte), podían resolverse el orto y el ocaso de los cuerpos celestes, así como sus variaciones con la latitud, por medio de la geometría esférica. La traza del segundo movimiento, la revolución anual del Sol a través del círculo de los signos zodiacales fijos, recibió el nombre de eclíptica. Puesto que ésta se halla inclinada 23,5 grados con respecto al ecuador, la posición del Sol con respecto al ecuador varía y su tiempo de orto y ocaso se altera en correspondencia.

Los dos movimientos y sus círculos correspondientes explicaban los grandes rasgos del mundo en el tiempo y en el espacio. Por ejemplo, la idea de "clima", que aludía a la coincidencia de ciertos fenómenos en distintos lugares; más tarde, surgieron las acotaciones de zonas heladas, templadas y tórridas. A menudo, tales zonas se definían por las sombras arrojadas por el Sol. La zona perisciana correspondía al lugar donde la sombra daba una vuelta diaria entera a un objeto; a la hetrosciana pertenecía el lugar donde la sombra era siempre al norte o siempre al sur a lo largo del año; finalmente, la zona anfisciana sombreaba un tiempo el norte y otro el sur.

Con ese telón de fondo podremos entender la estructura del universo presentada por los globos y las esferas armilares y explicada, para los medievales, en el *De Sphera* de Johannes Sacrobosco. Los globos mostraban los movimientos aparentes de las estrellas con respecto al horizonte; en las esferas armilares, unos anillos representaban el ecuador celeste y la eclíptica, en rotación respecto a los aros del horizonte y meridiano. La esfera armilar incluida en los *Libros del saber*, de Alfonso X, hundía sus raíces en la descrita por Ptolomeo en su *Almagesto*, sin relación directa con el "globo anillado" de Geminus. Los modelos de la misma ilustrados en el siglo XV eran estáticos, con una esfera fija y sin anillo de horizonte. A comienzos de esa centuria se había traducido al latín la *Geografía* de Ptolomeo, que aupó la cartografía

Mareas

TIDES: A SCIENTIFIC HISTORY, por David E. Cartwright. Cambridge University Press; Cambridge, 1999. Reimpresión 2000.

Es de creencia común que el fenómeno de las mareas está absolutamente tabulado y que, por ejemplo, la determinación de las horas a las cuales ocurrirá la pleamar, así como su intensidad, son el resultado de aplicar a cierta *caja negra* un conjunto de datos extraños, entre los que seguramente esté la posición de la Luna con respecto a la Tierra. Nada sabemos, en general, de cómo se ha llegado al convencimiento de que este astro tiene una importancia capital ni, evidentemente, de cuáles podrían ser los elementos de esa famosa *caja negra* que nos permiten llegar a una conclusión tan útil y perseguida desde hace siglos.

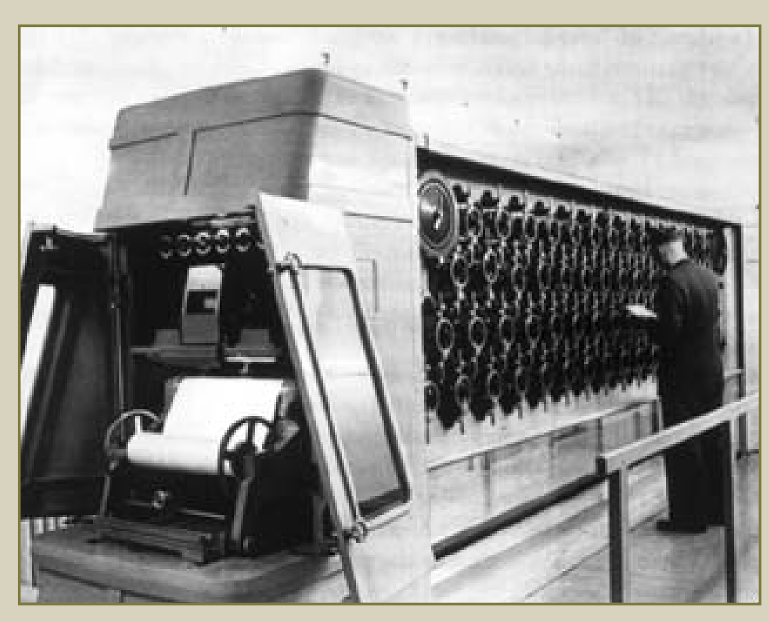
David E. Cartwright nos proporciona en este libro los caminos por los que ha discurrido el hombre para intentar explicar las mareas. Y lo hace muy bien, como conocedor profundo, ya que ha participado activamente en el desarrollo de esta rama de la ciencia a ambos lados del océano Atlántico y a lo largo de muchos años.

Hay ciertos libros que nos detallan la teoría de equilibrio de las mareas, ideada por Isaac Newton, incluyendo con mayor o menos extensión la historia previa. Es posible también encontrar numerosos artículos científicos, aunque asombrosamente pocos libros, que contengan ciertos esbozos de lo ocurrido después, desde las aportaciones fundamentales de H. Poincaré y el marqués de Laplace en el siglo XIX hasta lo ocurrido en nuestros días. No había hasta la fecha libro alguno, en mi conocimiento, que fuese capaz de abarcar la historia de la marea en detalle hasta prácticamente hoy mismo, incluyendo los recientes avances generados por la técnica de satélites. En todo este recorrido, Cartwright incluye detalles que son de agradecer, como dibujos, grabados y reproducciones de época de los personajes que intervienen, de las principales máquinas empleadas, o de los mismos resultados proporcionados por éstas, lo que aumenta considerablemente el placer e interés de la lectura.

Tides: A scientific history comienza detallando las ideas y observaciones primitivas acerca de la marea, entre las que se incluyen, además de varias curiosidades, una reseña de las civilizaciones indias y árabes, así como del papel desempeñado por los griegos, babilonios o romanos. Curiosamente, el autor dedica comparativamente poco espacio al desarrollo en el conocimiento de las mareas logrado en la antigua China, paralelo en muchos casos (o quizás incluso anteriores) a los europeos. Poco a poco se observa con claridad cómo las observaciones y los pensamientos fueron relacionando las fases lunares de luna nueva o llena con el momento de la pleamar, hasta llegar a la época prenewtoniana.

La época inmediatamente anterior a Newton es probablemente la parte más clásica del libro de Cartwright: las referencias que se incluyen a William Gilbert, Francis Bacon, Galileo o Descartes son más habituales en los libros que tratan sobre las mareas, y quizá por más conocidas llaman en este caso menos la atención. La teoría de equilibrio de Newton es tratada claramente y resalta, en contraste con las observaciones anteriores, el genio de su creador. Es gratificante encontrar una reproducción en latín, de sólo un par de columnas, de los *Principia* de Newton, en los cuales en poco espacio se describen las etapas fundamentales para definir las fuerzas que intervienen en la generación de la marea.

Recién casi 200 años después, en el siglo XIX, llega un empuje considerable a la teoría desarrollada por Newton, que no permitía obtener una estimación real local de la altura de las mareas. Cartwright centra el desarrollo de esa época alrededor del marqués de Laplace, a lo que dedica un largo capítulo, y al análisis armónico realizado por Lord Kelvin. Esta es una etapa fundamental en el desarrollo moderno de las mareas, cuya historia y logros se destacan y describen con claridad. A comienzos del siglo XX comienza a desarrollarse la oceanografía física de una forma importante, muchas veces como consecuencia de las grandes guerras, donde la propagación del sonido en el mar (comunicaciones, detección de submarinos/barcos, etc.) y el estudio de las mareas (desembarcos anfibios, por ejemplo) es fundamental.

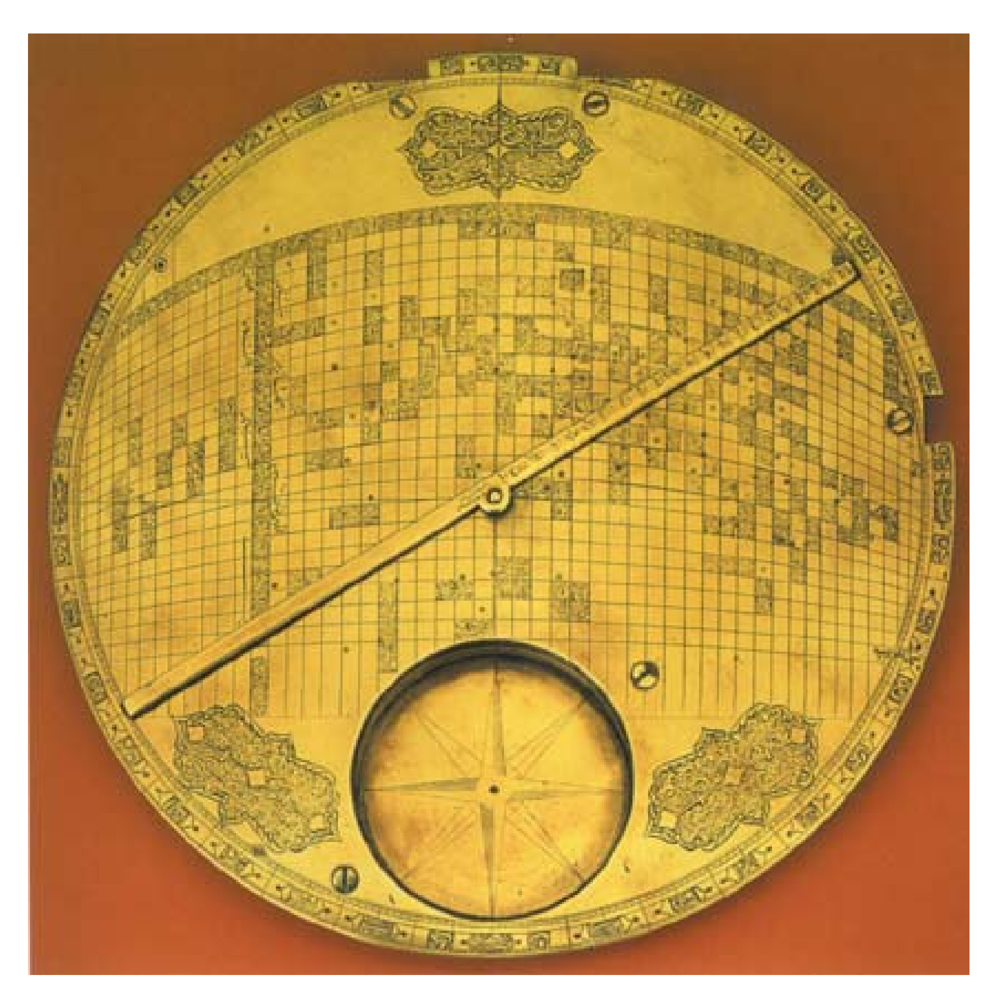


Máquina de predicción de las mareas, del Instituto Hidrogeográfico Alemán, construida en la víspera de la Segunda Guerra Mundial

Para aplicar los conocimientos obtenidos, sin embargo, fue necesario esperar hasta el advenimiento de los modernos ordenadores. Cartwright dedica un capítulo para mostrar nuevamente con claridad cómo se ve beneficiado el desarrollo de los modelos de mareas y el análisis de datos de nivel del mar por la revolución digital. El impacto de la técnica, con diversos instrumentos para medir alturas y el uso de los satélites, conforma la parte final del libro, y donde se nota la participación del autor con numerosos comentarios y valoraciones de interés. —RAMIRO A. VARELA

hasta un nivel desconocido. El descubrimiento del Nuevo Mundo trajo una nueva visión del globo terráqueo, mediante el ajuste y corrección de los cuadros ptolemaicos. Desde esos años finiseculares, las esferas armilares permitían demostrar el concepto de trepidación a través del movimiento de las esferas superiores. (La teoría de la trepidación, inventada en la Edad Media, sustituía a la idea ptolemaica clásica de la precesión constante de los equinoccios.)

Aunque inseparables del saber occidental, de intento hemos silenciado la astronomía y geografía musulmanas. No parece aventurado afirmar que pasarán años en superar la descripción de las mismas que nos ofrece David A. King en su soberbio *World-Maps for Finding the Direction and Distance to Mecca. Innovation and Tradition in Islamic Science*. El título general toma cuerpo en el examen minucioso de sendos mapas del mundo islámicos descubiertos, respectivamente, en 1989 y 1995. Construidos en latón, datan del Irán safávida del siglo XVII. Con La Meca en el centro, y apoyado en el reticulado de latitudes y longitudes, el usuario puede determinar la dirección y distancia hasta la ciudad santa desde cualquier punto del mundo, de Andalucía a China. Pero los datos geográficos proceden de una fuente del Asia central del siglo XV, en tanto que la matemática subyacente bajo el cuadriculado se desarrolló ya en el Bagdad del siglo IX. Tales mapas son, pues, independientes de los progresos en cartografía realizados en la Europa renacentista.



Reticulado cartográfico del mapa islámico del mundo, hallado en 1989. La Meca está en el centro

Lo primero que nos revela ese doble hallazgo es la existencia de una tradición medieval de construcción de mapas del mundo basada en tablas geográficas. Sabido es que la dirección sagrada hacia el santuario de la Kaaba o hacia la ciudad de La Meca se llama *qibla*. En su resolución precisa, nada trivial, se empeñaron figuras sobresalientes de la astronomía árabe: al-Nayrizi, al-Hasib, Ibn Yunus, Ibn al-Haytham y al-Biruni. Los dos instrumentos sobre los cuales están grabados los mapas representan la culminación de la cartografía islámica aplicada a ese afán. El primer ejemplar no presenta firma, en tanto que el segundo lo firma un tal Muhammad Husayn.

¿Qué aportan los mapas del mundo? Para averiguarlo, King se sumerge en la historia de la cartografía, la historia de la geografía matemática, la historia de la trigonometría, la historia de los instrumentos astronómicos (europeos e islámicos), la historia de la técnica, la historia de los relojes, así como en la historia de la decoración de los metales, sin olvidar el trasfondo cultural y religioso que las acunó. Para los musulmanes, la ejecución de sus principales actos rituales (tiempos de la plegaria y dirección del rezo) se halla asociada a procedimientos astronómicos y matemáticos.

La ciencia islámica fecha su nacimiento en la actividad traductora de textos griegos, hindúes y persas impulsada en Bagdad, a finales del siglo VIII y principios del IX, por al-Mansur y al-Mamun. De los griegos heredaron la geografía matemática y la cartografía, junto con la lista de unos 8000 lugares y sus latitudes y longitudes. La *Geografía* de Ptolomeo, con sus coordenadas de localidades e información adicional, se tradujo al árabe en más de una ocasión a mediados y finales del siglo IX.

Muy pronto, la versión acrítica se torna reorganización y sistematización del saber recibido. Desde el siglo XI se desarrollaron escuelas regionales. En Egipto y Siria (del siglo XIII en adelante) y en la Turquía otomana (a partir del siglo XV) los *muwaqqits*, astrónomos profesionales, adscritos a las mezquitas principales, se ocupaban del calendario, los tiempos de la plegaria y la *qibla*. Para ello idearon instrumentos que les permitieran no sólo calcular el tiempo del día o la noche, sino también representar la configuración instantánea de los cielos con respecto al horizonte del observador. (Desde el siglo VIII, fabricaron globos celestes, esferas armilares y astrolabios.)

La ciencia de la cosmología y de los movimientos planetarios se detallaba en los tratados de *ilm al-haya* (astronomía teórica), en tanto que los aspectos prácticos o aplicados se abordaban en los *zijes*. En los *zijes* hallamos, junto con textos explicativos, tablas de muy diversa índole (para la conversión calendárica, funciones trigonométricas, cálculo de posiciones y predicción de eclipses). En otros



Reticulado cartográfico del mapa islámico del mundo, hallado en 1995

libros se incluían tablas para la construcción de astrolabios y relojes de sol, para medir el tiempo por el Sol y las estrellas y para regular los tiempos de plegaria, así como para determinar la *qibla* de cualquier lugar. En todas las tablas, las entradas estaban escritas en base 60 y en notación árabe alfanumérica (*abajad*).

Los musulmanes realizaron notables contribuciones a la trigonometría, la herramienta primera de sus cálculos. Para derivar las fórmulas básicas de la astronomía esférica empleaban métodos de proyección (con los que los problemas de la superficie de una esfera se reducen a problemas de un plano: el astrolabio es una representación bidimensional de la esfera celeste tridimensional). Entre tales métodos, el procedimiento conocido por *analemma* constituía un útil potente.

En la primera mitad del siglo XV, en pleno dominio todavía de la ciencia arabizada, la geografía conoció una profunda transformación. Suele personificarse el momento en la figura de Enrique el Navegante, cuyo perfil humano y acción política saca a luz Peter Russell (*Prince Henry "the Navigator". A life*), exento de los afeites con que lo recamaron los cronistas áulicos. Para ahondar en el sustrato científico de la época es menester detenerse en *Geography, Cartography and Nautical Science in the Renaissance*, compilación de una veintena de estudios de W.G.L. Randles.

Lo mismo en la *Crónica de la toma de Ceuta* que en la *Crónica de Guinea* Enrique, nacido en 1394, es el arquetipo de héroe medieval, protagonista de todas las hazañas. Pero la verdad histórica nos revela que, sin menoscabo de su interés por las expediciones oceánicas, el hijo de Juan I y Felipa de Lancaster no tuvo más experiencia marinera que la corta jornada entre el Algarve y Ceuta. Esta plaza, conquistada en 1415, constituía una base de corsarios, amén de mercado del oro con las caravanas saharianas. Por su estratégica situación, vigilaba y controlaba la entrada al Mediterráneo.

Mas cuando parecía que los portugueses proseguirían su avance contra el Islam del norte de Africa, Enrique, conocedor de las "cartas oceánicas", decidió aventurarse por la costa atlántica. Fracasó en la expedición de 1424 para incorporar a la corona lusa el archipiélago canario. Mejor suerte les cupo a sus legados Juan Gonzalves Zarco y Tristán Vaz en el redescubrimiento de Madeira, Porto Santo y Deserta. Planta asentamientos en las "siete islas de las Azores".

De notorio interés científico resultó la colonización del archipiélago de Cabo Verde. Había que adentrarse en los mares temidos e ignotos, allende el cabo Bojador. Sin embargo, ese emblemático promontorio, doblado por los portugueses en 1434, no era el que aparece en los mapas actuales como tal (26º 07' latitud Norte), sino el cabo Juby. Los exploradores encontraron regiones de corrientes intensas de marea, bancos de arena e islas lejanas que hacía insegura la navegación de las carabelas.

Randles, investigador de larga trayectoria en la historia geográfica medieval y renacentista, se adhiere a la tesis de Luis de Albuquerque sobre el carácter genuinamente portugués (escuela de Sagres) de la ciencia náutica que posibilitó la gesta de Enrique. Señala que las cartas náuticas italianas del siglo XIV comenzaron progresivamente a mostrar las Canarias, Madeira, Porto Santo y las Azores, aunque todas alineadas a lo largo de un eje N/S, sin ninguna indicación de las distancias.

Para orientarse, los marinos lusos se apoyaban en las líneas de rumbo magnéticas, que ellos convertían en derrota; para establecer la distancia aplicaban una escala (*tronco das léguas*) sobre la carta náutica. A medida que se aproximaron al ecuador (lo cruzaron entre 1472 y 1474) la Estrella Polar se hundía en el horizonte, hasta desaparecer. En ese momento crucial, la altitud meridiana del Sol sustituyó a la observación de la altura de la Estrella Polar, permitiendo la navegación en los dos hemisferios. Hacia 1480 los marinos portugueses reemplazaron su cuadrante ineficaz para la observación del Sol por el astrolabio náutico, un sencillo instrumento que constaba de un anillo graduado y de una alidada con dos pínulas relativamente próximas entre sí.

El cálculo de las latitudes mediante la observación de las altitudes del Sol en el meridiano, técnica indis-



Enrique el Navegante. Al fondo, fragmento de una carta portulana portuguesa del siglo XV

pensable para los pronósticos astrológicos, se conocía en Europa desde el siglo XII, pero no se aplicó en cartografía y navegación hasta el siglo XV. Los primeros textos específicamente escritos para los navegantes, que exponían las reglas de proceder en el cálculo de las latitudes a partir de la observación de las altitudes del Sol en el meridiano, aparecieron a comienzos de la centuria siguiente. Lo mismo el *Regimento do astrolabio e do quadrante* que el *Regimento da declinaçam do sol* contienen tablas de números para determinar la declinación del Sol en una fecha determinada. Estas tablas, indispensables para el cálculo de las latitudes, las había confeccionado Abraham Zacuto (1452-1515).

A la figura y obra de este judío salmantino dedicó valiosos estudios Cantera Burgos, labor que han proseguido José Chabás y Bernard R. Goldstein (*Astronomy in the Iberian Peninsula: Abraham Zacut and the Transition from Manuscript to Print*). Salido de España tras el decreto de expulsión de 1492, su obra científica había empezado veinte años antes y continuó a lo largo de su exilio por Portugal, Africa del Norte y Jerusalén, donde se cree que murió.

Su libro sobre astronomía *ha-Hibbur ha-gadol* (*La gran composición*) consta de cánones y tablas. Escrito en hebreo, Juan de Salaya lo tradujo en 1481. El *Almanach Perpetuum*, publicado en 1496, contiene un resumen de las tablas del *Hibbur* y una retahíla de cánones. En las tablas de los almanaques se daba entrada a las posiciones ocupadas por un planeta (incluidos el Sol y la Luna), dispuestas a intervalos de un día o de varios días en el curso del período de movimiento del cuerpo celeste. Chabás y Goldstein nos descubren que las tablas del *Almanach* se confeccionaron a partir de las *Tablas alfonsinas*.

Por paradójico que parezca, las tablas del rey sabio no se emplearon en España hasta mediados del siglo XV con la llegada de Nicholaus Polonius, catedrático de astronomía de la universidad salmantina y autor de unas *Tabulae Resolutae*. A esa tradición cristiana, no confesa, une Zacuto la de su propia estirpe, de Levi ben Gerson, Immanuel ben Jacob Bonfils, Judah ben Asher y Judah ben Verga. Y, por supuesto, el legado árabe.

Con el fin de facilitar la navegación, en 1530 Gemma Frisius proponía el uso de relojes portátiles para el cálculo de la longitud. Pero el problema fundamental residía en la medida de la posición de la Luna con respecto a las estrellas. Un error de un minuto en el ángulo de observación comportaba un desvío de medio grado de longitud. Para sacarle mayor rendimiento al uso de los instrumentos de observación astronómica, permitiendo medir con precisión fracciones de grado (minutos, segundos, etc.), Fabrizio Mordente (1532-1608) inventó un compás de proporción de ocho puntas, inspirado en la ballestilla española y el cuadrante de Pedro Núñez (*Il Compasso di Fabrizio Mordente. Per la storia del compasso di proporzione*). Guidobaldo del Monte glosó la excelencia del método en una breve memoria, Cristoforo Clavio lo elogió en su tratado sobre los relojes solares y Giordano Bruno calificó a su autor de "dios de la geometría".

Si por compás de reducción hemos de entender el instrumento utilizado para reproducir los dibujos a escala, con dos brazos cruzados y centro fijo o móvil cuyas puntas opuestas forman relaciones sencillas de 1:2, 1:3 u otras, el compás de proporción se apoyaba, en cambio, en las propiedades proporcionales de los triángulos semejantes para operaciones aritméticas, geométricas o trigonométricas. Dividíase, a su vez, en compás de proporción de cuatro puntas, compás de proporción de ocho puntas y compás de proporción de brazos planos. El de cuatro puntas, afín al compás de reducción aunque con centro móvil y diversas escalas proporcionales incisas sobre los brazos, servía para dividir líneas y circunferencias en partes iguales, dibujar polígonos regulares, reproducir dibujos y desarrollar algunas operaciones geométricas y estereométricas. No desarrollaba operaciones de cálculo, ni topográficas, capacidad exclusiva del de ocho puntas y del compás de brazos planos.

El compás de Mordente, de ocho puntas, portaba cursores y una regla con diversas escalas proporcionales. Sólo lo eclipsó la extraordinaria fortuna del compás geométrico y militar de Galileo Galilei. Morente lo había ido refinando a lo largo de los años. La primera edición de su método lleva un título significativo *Modo di trovare con l'Astrolabio, ò Quadrante, ò altro instromento, oltre gradi, intieri, i minuti, et secondi et ogn'altra particella* (Venecia, 1567). Desde 1572 lo adapta no sólo para la medición de los grados, sino también en función del cálculo proporcional. El compás presenta ahora los brazos planos y hendidos a lo largo de los cuales discurren los cursores con puntas ortogonales al plano de

los brazos; otras tres puntas ortogonales, aunque fijas, se encuentran en las extremidades de los brazos y en correspondencia con el perno. Al compás se le une una regla con escalas graduadas: la división en 60 partes iguales, la escala de los polígonos y la de la división de la línea en partes proporcionales. En 1585, el compás es ya del tipo de “ocho puntas”. La regla está sustituida por un cuadrante con el lado dividido en 12 partes, que permite medir las fracciones de tres modos diversos. Entre 1587 y 1591, el compás alcanza su forma definitiva. Respecto a la versión precedente presenta un cursor doble y está acompañado de una regla paralela con escalas graduadas para operaciones de geometría plana y sólida.

Ese y otros refinamientos confieren seguridad creciente a la navegación. Falta dar un nuevo salto teórico. La imagen del mundo sufre una modificación espectacular con las expediciones científicas de La Pérouse, Bouguer, La Condamine, Maupertuis, James Cook, Louis-Antoine de Bougainville, Joseph Banks y las españolas. Es la época de la Ilustración (*Geography and Enlightenment* y *Geography Unbound. French Geographic Science from Cassini to Humboldt*). En libro dirigido por David N. Livingstone y Charles W. J. Withers busca las raíces de ese giro en la Venecia del siglo XVII. La fantasía de los navegantes se somete ahora a la disciplina de los naturalistas de a bordo. Se sigue un plan de recolección y clasificación de datos; se comparan resultados y observaciones.

La propia geografía se torna metáfora del momento. Diderot llamaba a la *Enciclopedia* el “mapa del mundo”. Era la culminación del sueño del Rey Sol que encargó para Versalles dos inmensas esferas de 3,9 metros de diámetro, a instalar en salas con motivos astronómicos de sistemas celestes, eclipses y fases lunares. (Terminarían por colocarse, sin embargo, en el castillo de Marly.) El autor de las esferas, Vincenzo Maria Coronelli (1650-1718), fundó la primera sociedad geográfica de Europa, la “Accademia degli Argonauti”, bajo cuyo sello se imprimieron textos, mapas y globos. El mismo publicó un *Corso Geografico Universale*, sumario de un vastísimo *Atlante Veneto*. En este atlas la geografía se imbrica en la descripción total (política, histórica, demográfica, etcétera) del mundo.

Una espesa carga ideológica fluye de la pluma Anne Marie Claire Godlewska, cuyo ensayo crespo de interrogantes sin despejar no termina por decantarse en un discurso coherente. Abusa de las expresiones rotundas, o simples, según se mire. Del tenor siguiente: en el pensamiento griego clásico, la geografía y la astronomía estaban estrechamente entrelazadas. ¿Sólo entonces? Otra afirmación contundente: en la Europa medieval y renacentista, el cosmos estudiado por la geografía incluía necesariamente la voluntad divina que otorgaba sentido a la Tierra y a sus habitantes. ¿Puede decirse tal de los *libri naturales*, al menos sin matizar?

Con el período revolucionario y las guerras napoleónicas, el desarrollo de la estadística y la emergencia del pensamiento económico, los geógrafos empezaron a prestar mayor atención a la descripción de la actividad humana sobre la superficie de la Tierra. Pero no aumentó su nervio teórico, que durmió hasta el último tercio del siglo XIX. Cierto es que no le faltó a la geografía un motor normativo, como cuando Philippe



V. M. Coronelli: Emblema de la “Accademia degli Argonauti”

Turbulencias

TURBULENT FLOWS, por Stephen B. Pope. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.
TURBULENT FLOWS-MODELS AND PHYSICS, por Jean Piquet. Springer Verlag; Berlín, 1999.

Ya Leonardo da Vinci intentó comprender la turbulencia; se conservan algunos croquis suyos describiendo el fenómeno. Y no es que se ceje en el empeño. A mediados del siglo XX se abordó de nuevo el problema con renovado ímpetu, casi se podría decir que confiada y alegremente. Un impulso que todavía pervive. Mas los científicos han mordido en hueso. Sí, nuevas ideas (citemos simplemente las teorías de Kolmogorov) han resultado de gran utilidad. Sin embargo, para convencerse de que la última palabra aún no está dicha basta ver la vibrante actividad de los investigadores que hoy día siguen interesándose en la cuestión.

Un nuevo enfoque ha venido a completar el trabajo teórico y experimental, a saber, la simulación de los flujos turbulentos por ordenador. Si no somos capaces de desvelar los secretos de la turbulencia, al menos —en muchos casos— los cálculos pueden proporcionarnos un modelo razonable. Enfoque que no está exento de peligro; en efecto, algunas de las hipótesis —pensemos en la llamada simulación de grandes escalas— no tienen un apoyo teórico ni experimental firme. Al ingeniero puede bastarle la receta para una situación particular; mas para la ciencia básica, es insuficiente.

Los dos libros reseñados se inscriben en esta tradición, llegando hasta los aspectos más modernos y prestando una especial atención a la simulación informática. Hay que tener en cuenta que estas monografías especializadas requieren cierta formación matemática y científica.

La obra de Pope, más didáctica, está dividida en dos partes: los fundamentos, por un lado, y los modelos y las simulaciones, por otro. Los principios son expuestos en un contexto amplio y accesible al estudiante de doctorado —a quien le puede ser de gran utilidad— o al científico o ingeniero que se adentra por primera vez a esta materia. Los resultados esenciales están claramente desarrollados, y los aspectos particulares se proponen como ejercicio. Se consagra una buena parte a los modelos numéricos, y cubre con holgura lo esencial. El volumen de Piquet, en cambio, es mucho más estricto y formal. Se centra sobre todo en los modelos y en las simulaciones numéricas, y se detiene menos en los aspectos básicos. La descripción es completa y detallada, el enfoque más riguroso (a veces demasiado matemático). Aborda temas originales, como los contenidos en el capítulo 6 (“Efectos complejos en los flujos turbulentos”), orientados frecuentemente a las aplicaciones prácticas avanzadas. Va destinado a un público de investigadores y de ingenieros especializados en la materia, o al menos con un cierto conocimiento de ella. En ambas obras, los resultados se complementan con numerosas curvas experimentales (de una presentación más cuidada en el libro de Pope).

—ANGEL GARCIMARTÍN

Buache, en 1752, postuló una descripción predictiva de las montañas del mundo que debían cumplir todas las formaciones. Hubo también teorías sobre la localización y la naturaleza de El Dorado que condujeron a la exploración del interior del Perú, Venezuela, Colombia, y las cuencas del Orinoco y el Amazonas.

En el intervalo abordado, desde 1760 hasta mediados del siglo XIX, los geógrafos franceses se numeraban entre los mejor reputados de Europa. Las instituciones que le dieron cobijo y medio de difusión fueron la *Encyclopédie* (18 páginas a doble columna), la Academia de Ciencias (donde se sentaron Sébastien Le Preste, Jean Dominique Cassini, Philippe de La Hire, Jacques Ozanam y Jean Piccard, en un primer momento y, más tarde, Guillaume Delisle, Jacques Cassini, Joseph Nicolas Delisle, Philippe Bouache, Jean Baptiste Bourguignon d’Anville, César François Cassini de Thury y Nicolas Desmaret), los colegios jesuitas y los colegios militares (en particular la “Ecole du corps royal du génie” de Mézières). Se detiene en la geografía universal de Malte-Burns para ocuparse, por fin, de la renovación que llega desde la frontera, es decir, desde la sociología y estadística. Tras inclusiones de interés, así la evolución y cristalización del lenguaje geográfico, resalta la fuerza de Alexander von Humboldt, develador de las interacciones entre fenómenos naturales y defensor del equilibrio entre la observación empírica y el razonamiento teórico, entre la exploración y la explicación de las causas del fenómeno.

Del cosmos humboldtiano a nuestro conocimiento del universo. La aparición reciente de la magna *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, dirigida por Paul Murdin, ha sido saludada con unánime aplauso. Para resaltar su óptima naturaleza se ha escrito que el astrónomo profesional, experto quizás en la estructura estelar, podría interesarse por el trabajo de otros especialistas afines (física nuclear, cúmulos estelares, agrupamientos estelares de las galaxias o la edad del sistema solar), los biólogos por las condiciones de vida de otros planetas, el físico por los efectos de la relatividad en los agujeros negros. Por fin, el no especialista hallará aquí una biblioteca con la respuesta concisa y autorizada sobre la cuestión que le apremia.

Para satisfacer demandas tan dispares, las explicaciones se gradúan en distintos niveles de profundidad. La elección de los artículos (2500) y sus redactores (800) corrió a cargo de un equipo director, escogido a su vez por su autoridad y representatividad (Francisco Sánchez en el caso español). Quizás existe cierta descompensación a favor del Sol y el sistema solar, disciplina en la que España revela la calidad de su investigación en ese campo con sendas colaboraciones de M. Vázquez, sobre manchas solares, y de F. Moreno-Insertis, acerca del interior solar.

Superando los límites de la imaginación de la infancia de muchos, las sondas han penetrado en los límites del sistema solar y se han detectado planetas que giran en órbita alrededor de estrellas. Los telescopios han recogido imágenes de galaxias tan lejanas, que su luz se emitió hace 10.000 millones de años, cuando acababan de formarse. Mediciones precisas del último resplandor de la gran explosión nos revelan qué aconteció pocos segundos después del comienzo de la historia cósmica. El propio cosmos se ha convertido en laboratorio para someter a prueba las condiciones extremas que nunca podremos obtener en la Tierra.

LUIS ALONSO